



TITLE:

音像の空間的印象に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

黒住, 幸一

CITATION:

黒住, 幸一. 音像の空間的印象に関する研究. 京都大学, 1987, 工学博士

ISSUE DATE:

1987-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6188>

RIGHT:

音像の空間的印象に関する研究

黒 住 幸 一

音像の空間的印象に関する研究

黒 住 幸 一

DOC
1986
21
電気系

音像の空間的印象に関する研究

目次

第1章 序論	1
§ 1.1 研究の背景および目的	1
§ 1.2 本研究の概要	3
第2章 2チャンネル音響信号の相互相関関数と相関係数	4
§ 2.1 概観	4
§ 2.2 2チャンネル音響信号の相互相関関数と相関係数	4
§ 2.3 相関係数の異なる白色雑音対	4
§ 2.4 結言	7
第3章 2チャンネル音響信号の相関係数とヘッドホン受聴時における音像の空間的印象	8
§ 3.1 概観	8
§ 3.2 音像の空間的印象に関する類似性実験と分析	8
3.2.1 音響信号および実験方法	8
3.2.2 分析方法：多次元尺度構成法(MDS)	9
3.2.3 実験結果	9
§ 3.3 音像の空間的印象を規定する心理的要因	11
3.3.1 実験方法	11
3.3.2 分析方法	11
3.3.3 実験結果	12
§ 3.4 検討	14
3.4.1 音像の空間的印象を規定する心理的要因	14
3.4.2 音像の空間的印象に及ぼす周波数帯の効果	14
3.4.3 相関係数の弁別に及ぼす周波数帯の効果	15
§ 3.5 結言	16

第4章 2チャンネル音響信号の相互相関関数とヘッドホン受聴時における音像の空間的印象	17
§ 4.1 概観	17
§ 4.2 実験方法および分析方法	17
§ 4.3 音響信号および実験結果	18
§ 4.4 音像の空間的印象を規定する心理的要因	23
§ 4.5 検討	27
4.5.1 音像の拡がり感	27
4.5.2 音像の左右方向感	27
4.5.3 音像の上下方向感	28
4.5.4 音像の空間的印象に関する布置の相互関係	29
§ 4.6 結言	29
第5章 2チャンネル音響信号の相互相関関数と音像の拡がり感	30
§ 5.1 概観	30
§ 5.2 相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感	30
5.2.1 音響信号	31
5.2.2 実験方法および分析方法	31
5.2.3 実験結果	32
5.2.4 検討および考察	34
§ 5.3 相互相関関数が2つのピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感	35
5.3.1 音響信号	36
5.3.2 実験方法および分析方法	37
5.3.3 実験結果	37
5.3.4 検討	38
§ 5.4 くし型の振幅－周波数特性を持つ雑音対の音像の拡がり感	39
5.4.1 音響信号	39
5.4.2 実験方法および分析方法	41
5.4.3 実験結果	41
5.4.4 検討	42
§ 5.5 結言	42

第6章	2チャンネル音響信号の相関係数とスピーカ再生における音像の空間的印象	44
§ 6.1	概観	44
§ 6.2	音像の空間的印象に関する類似性実験と分析	45
6.2.1	実験方法および分析方法	45
6.2.2	実験結果	46
§ 6.3	音像の空間的印象を規定する心理的要因	46
6.3.1	実験方法および分析方法	46
6.3.2	実験結果	48
§ 6.4	検討	49
6.4.1	音像の空間的印象を規定する物理的要因と心理的要因の対応関係	49
6.4.2	音像の空間的印象に及ぼす周波数帯の効果	50
6.4.3	音響信号間の相関係数と両耳間相関係数	51
6.4.4	音像の空間的印象に及ぼす残響の効果	52
§ 6.5	結言	57
第7章	音像の空間的印象の定量的表現	59
§ 7.1	概観	59
§ 7.2	基本的な考え方	60
§ 7.3	実音像のマスキングパターン (実験 I)	60
7.3.1	実験方法	60
7.3.2	実験結果	62
§ 7.4	合成音像のマスキングパターン (実験 II)	64
7.4.1	実験方法	64
7.4.2	実験結果	65
7.4.3	検討	68
§ 7.5	ヘッドホン再生による音像のマスキングパターン (実験 III)	69
7.5.1	マスキーをスピーカを用いて提示した場合	69
7.5.2	マスキーをヘッドホンを用いて提示した場合	70
§ 7.6	従来の研究結果に対する考察	72
§ 7.7	結言	72

第8章 相関係数変化法による音像の新しい拡がり感制御方式	74
§ 8.1 概観	74
§ 8.2 従来の擬似ステレオ方式	74
8.2.1 くし型フィルタ方式	74
8.2.2 残響音付加方式	75
8.2.3 Schroeder 方式	75
8.2.4 高域周波数帯反転方式	76
§ 8.3 新しい擬似ステレオ方式	76
8.3.1 帯域分割方式	77
8.3.2 移相方式	78
8.3.3 2チャンネル音響信号の相互相関関数	81
§ 8.4 心理実験	83
8.4.1 音響信号	83
8.4.2 実験方法および分析方法	85
8.4.3 実験結果	85
8.4.4 音像の空間的印象を規定する心理的要因	86
8.4.5 音像の幅	87
8.4.6 移相式擬似ステレオ方式	88
§ 8.5 結言	88
第9章 相関係数変化法による音像の距離感制御方式	89
§ 9.1 概観	89
§ 9.2 従来の音像の距離感制御方式	89
§ 9.3 音像の距離感制御法Ⅰ（90° 移相回路方式）	89
§ 9.4 心理実験	93
9.4.1 音響信号	93
9.4.2 実験方法および分析方法	94
9.4.3 実験結果	94
9.4.4 音像の空間的印象を規定する心理的要因	95
§ 9.5 音像の距離感制御法Ⅱ（ α° 移相回路方式）	96
§ 9.6 音像の距離感制御法Ⅲ（遅延回路方式）	98
§ 9.7 結言	99

第 10 章 結論	100
謝 辭	102
参考文献	103
付録 1	111
付録 2	114
付録 3	116
付録 4	117

本論文に用いた主な記号

$L(t)$	左の音響信号
$R(t)$	右の音響信号
L_0	左の音響信号を合成するときの信号で遅延回路を通さない信号
R_0	右の音響信号を合成するときの信号で遅延回路を通さない信号
L_{τ_0}	左の音響信号を合成するときの信号で遅延時間 τ_0 の遅延回路を通した信号
R_{τ_0}	右の音響信号を合成するときの信号で遅延時間 τ_0 の遅延回路を通した信号
$n_1(t)$	白色雑音 1 (WN 1)
$n_2(t)$	白色雑音 2 (WN 2)
$\overline{n_1^2}$	白色雑音 1 の 2 乗平均電圧
$\overline{n_2^2}$	白色雑音 2 の 2 乗平均電圧
$n_0(t)$	左右の雑音の同位相成分
$n_\pi(t)$	左右の雑音の逆位相成分
$a_f(t)$	雑音の周波数 f における振幅
$n_f(t)$	左の雑音の周波数 f の成分
$m_f(t)$	右の雑音の周波数 f の成分
B_0	同位相成分の帯域幅の和
B_π	逆位相成分の帯域幅の和
$\Delta \theta$	全帯域にわたって一定の位相差を持つ 2 つの雑音の位相差
$r(\tau)$	左右の音響信号の相互相関関数
r	左右の音響信号の相関係数, すなわち, $r(0)$ の値
$\delta(\tau)$	ディラックの δ 関数
τ_0	遅延回路の遅延時間
r_{τ_0}	$\tau = \tau_0$ における相互相関関数の値, すなわち, $r(\tau_0)$ の値
$r_{-\tau_0}$	$\tau = -\tau_0$ における相互相関関数の値, すなわち, $r(-\tau_0)$ の値
r_p	単一のピークを持つ相互相関関数のピークの値
S stress	類似度の順序と対象間距離の単調関係からのずれの程度を表す指標 (適合度)
DIM 1,2,3	空間布置における直交座標系の I 軸, II 軸および III 軸

第1章 序 論

1. 1 研究の背景および目的

音声や音楽を收音・再生するいわゆるオーディオ技術の発達に伴い、わたしたちは聞きたい音をいつでもどこにいても聞くことができるようになった。また、ここ数年のオーディオ技術の進歩は著しく、PCM録音・再生のできる高忠実度なオーディオ装置が一般家庭に普及してきた。これらのオーディオ装置の再生周波数帯域は 約 10 Hz~20 kHz, ダイナミックレンジは 90 dB以上であり⁽¹⁾, 人間の可聴周波数帯域が約 20 Hz~20 kHzであること, 聴覚のダイナミックレンジが約 120dBであること⁽²⁾などを考慮すれば, 高忠実度再生という点においてはほぼ満足できるものである。

ところで, 1チャンネルの音響信号の收音・再生つまりモノ(モノホニック)では話の内容や音楽のメロディなどを伝えることはできるが, 例えば, 演奏会場における楽器の配置とかステージの広さなどといった音の空間的な印象を伝えることはできない。ところが, 2チャンネルの音響信号を收音・再生するいわゆるステレオ(ステレオホニック)では音像(音源の心理的なイメージ)の空間的な印象を伝えることができるようになるので, モノとは比較にならないほど豊かな音場や臨場感が感じられる。最近のオーディオ装置の殆どはステレオであり, ここで改めてステレオの利点を述べる必要はないであろう。

2チャンネル音響信号を如何に高忠実度に收音・再生するかといういわばハードに関する研究はすでに述べたように一定のレベルに達している。しかし, 2チャンネル音響信号を聴取することによって生じる心理的な効果を解明するいわばソフトに関する研究では未だに明かにされていないことが多く残っている。

そこで, まず始めに心理的な側面からなされたステレオに関するこれまでの研究を概観する。従来の研究を大別するとほぼ

- i) 音像の左右方向感に関する研究 (3)-(34)
- ii) 音像の上下方向感に関する研究 (35)-(47)
- iii) 音像の距離感に関する研究 (48)-(58)
- iv) 音像の拡がり感に関する研究 (59)-(69)

に分類することができる。

音像の左右方向感に関する研究には優れた研究が多く, スピーカ再生においては2チャンネル音響信号のレベル差および時間差(または位相差)を変えることによって音像

の水平面内の定位方向をある程度任意に制御できることが明らかにされている。ただし、最近のレコードやFM放送ではレベル差のみを変えて左右方向感を制御することが多い。したがって、最近のステレオのことをインテンシティステレオと呼ぶことが多い。一方、音像の上下方向感は主として音響信号の振幅一周波数特性に、音像の距離感は主として音の大きさや間接音の大きさに依存することが指摘されている。しかし、現在のところこれらの心理的要因を規定する決定的な物理的要因は見い出されていない。さらに、音像の拡がり感に関する研究では間接音成分が多くなるほど、また、2チャンネル音響信号の相関係数が小さくなるほど音像の拡がり感の大きくなることが指摘されている。しかし、音像の拡がり感に関しても、相関係数を負の範囲まで系統的に提示して調べた研究がないので明らかにされていない部分が残っている。

このように音像の左右方向感を規定する物理的要因は明確にされているので、それを制御することは可能となっているが、他の音像の空間的印象を規定する物理的要因には不明な点が残っているので、それらを自由に制御できるまでには至っていない。そこで、2チャンネル音響信号を再生することによって生じる音像の空間的印象を規定する物理的要因および心理的要因の対応関係を解明することによって、音像の左右方向感以外の音像の空間的印象を自由に制御することが可能になると考えられる。

ところで、2チャンネル音響信号を再生することによって生じる音像の空間的印象を解明するためには、2チャンネル音響信号のチャンネル間に何等かの物理的な差異を与える必要がある。2チャンネル音響信号のチャンネル間の物理的な差異としてはレベル差、時間差（または位相差）あるいは相関係数、相互相関関数などが考えられる。しかし、レベル差および時間差（または位相差）が音像の左右方向感を規定することは明らかにされていること、レベル差以外の物理的な差異は相互相関関数を用いて記述できることなどを考慮して、本研究ではチャンネル間の物理的な差異を相関係数または相互相関関数で表すことにする。また、一般の音響信号が広い周波数帯域を有することを考慮して、音響信号にはすべての周波数成分を有する白色雑音を主として用いることにする。すなわち、本研究は、2チャンネル音響信号として白色雑音を用い、その相関係数または相互相関関数と音像の空間的印象の対応関係を心理実験により解明したものである。その結果、ヘッドホン再生およびスピーカ再生のいずれにおいても2チャンネル音響信号の相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど音像の拡がり感の大きくなること、スピーカ再生においては2チャンネル音響信号の相関係数が小さくなるほど音像の距離感の小さくなることなどを定量的に明らかにした。さらに、これらの結果に基づいて音像の拡がり感および距離感を制御する新しい方法を提案した。

1. 2 本研究の概要

第1章は序論である。

第2章では2チャンネル音響信号の相互相関関数と相関係数の定義を行い，本研究で主として用いた音響信号である相関係数の異なる白色雑音対について述べる。

第3章ではヘッドホン受聴時における音像の空間的印象と2チャンネル音響信号の相関係数の対応関係を明らかにする。

第4章ではヘッドホン受聴時における音像の空間的印象と2チャンネル音響信号の相互相関関数の対応関係を明らかにする。

第5章では音像の空間的印象を規定する1つの要因である音像の拡がり感が2チャンネル音響信号の相互相関関数によってどのように変化するのかを定量的に示す。

第6章ではスピーカ再生における音像の空間的印象と2チャンネル音響信号の相関係数の対応関係を明らかにする。

第7章ではスピーカ再生およびヘッドホン受聴時における音像の空間的印象をマスキング量が空間的に変化することを利用して定量的に示す。

第8章では第3～7章で得られた結果に基づいて音像の拡がり感を制御する方式を新しく提案する。

第9章では第6章で得られた結果に基づいて音像の距離感を制御する方式を新しく提案する。

第10章は結論である。

第2章 2チャンネル音響信号の相互相関関数と相関係数⁽⁷⁰⁾⁽⁷¹⁾

2.1 概観

この章では、2チャンネル音響信号の相互相関関数と相関係数を定義する。次に、2チャンネル音響信号として本研究で主として用いた、相関係数の異なる白色雑音対について述べる。

2.2 2チャンネル音響信号の相互相関関数と相関係数

左右の音響信号の相互相関関数 $r(\tau)$ を

$$r(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T R(t) \cdot L(t+\tau) dt}{\left[\frac{1}{T} \int_0^T R^2(t) dt \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{1}{T} \int_0^T L^2(t) dt \right]^{1/2}} \quad (2.1)$$

で定義する。ここに、 $L(t)$ および $R(t)$ は時刻 t における左右の音響信号の波形の瞬時値を表す。左右の音響信号の相関係数 r は (2.1) 式の $\tau = 0$ の値、すなわち、 $r(0)$ である。

2.3 相関係数の異なる白色雑音対

特殊な場合として相互相関関数 $r(\tau)$ が $\tau \neq 0$ では常に0となる場合がある。このような相互相関関数をもつ白色雑音対をこの論文では単に相関係数の異なる白色雑音対と呼ぶことにする。相関係数の異なる白色雑音対の集合は、相互相関関数の異なる白色雑音対の部分集合であるが、特殊な場合なので以下の議論においては区別して扱うことにする。また、周波数の上限が無限にのびた白色雑音と白色雑音の最高周波数を20 kHzに制限した雑音とは、聴覚的にはほとんど差がないと考えられるので、この論文では20 kHz までの成分を有する雑音を白色雑音と呼ぶことにする。

相関係数の異なる白色雑音対を合成する方法として、Licklider⁽⁵⁹⁾ および Jeffress⁽⁷²⁾ は3つの独立な白色雑音源を用いる方法を提案しているが、ここでは2つの独立な白色雑音源を用いる方法を採用する。

相関係数の異なる白色雑音対の合成方法を Fig. 2.1 に示す。2つの独立な白色雑音

WN1 および WN2をそれぞれ音量減衰器（A1およびA2）によって減衰した後2分岐し、一方の白色雑音(WN1)を左右同位相で、他方の白色雑音(WN2)を左右逆位相で合成する。音量減衰器A1およびA2により減衰したあとの WN1および WN2の瞬時電圧を便宜上それぞれ $n_1(t)$, $n_2(t)$, それらの2乗平均電圧をそれぞれ $\overline{n_1^2}$, $\overline{n_2^2}$ とする。Fig. 2.1 では L（左）チャンネルが[$n_1(t) + n_2(t)$] , R（右）チャンネルが[$n_1(t) - n_2(t)$] である。したがって、白色雑音対の相関係数 r は(2.1) 式より

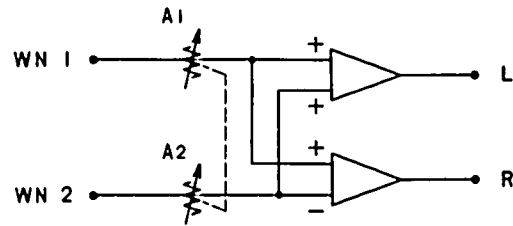
$$r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [n_1(t) - n_2(t)] \cdot [n_1(t) + n_2(t)] dt}{\left[\frac{1}{T} \int_0^T [n_1(t) - n_2(t)]^2 dt \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{1}{T} \int_0^T [n_1(t) + n_2(t)]^2 dt \right]^{1/2}} \quad (2.2)$$

となる。ただし、(2.1)式で $r = 0$ とした。 $n_1(t)$ と $n_2(t)$ は独立だから (2.2)式は

$$r = \frac{\overline{n_1^2} - \overline{n_2^2}}{\overline{n_1^2} + \overline{n_2^2}} \quad (2.3)$$

となる。

白色雑音のレベルは両チャンネルとも等しく[$\overline{n_1^2} + \overline{n_2^2}$]である。したがって[$\overline{n_1^2} + \overline{n_2^2}$]を一定に保ちながら $\overline{n_1^2}$ および $\overline{n_2^2}$ を変化させれば (2.3)式で示すように相関係数 r を1から-1まで変えることができる。例えば、2つの白色雑音の2乗平均出力電圧が等しい場合には、2つの音量減衰器を Fig. 2.1 に示す値に設定することにより、チャンネル間レベル差を0 dBとし、出力レベルを一定に保ったままで、相関係数 r を1, 2/3, 1/3,



r	1	2/3	1/3	0	-1/3	-2/3	-1
A1 (dB)	0	0.8	1.8	3.0	4.8	7.8	∞
A2 (dB)	∞	7.8	4.8	3.0	1.8	0.8	0

Fig. 2.1 Block diagram for synthesizing white noises with the various cross-correlation coefficients r , and the relationship between the cross-correlation coefficients and the attenuation levels.

0, $-1/3$, $-2/3$ および -1 とすることができる。

実験に用いた白色雑音 (General Radio社製白色雑音発生器 Type 1382の出力を20 kHz の低域通過フィルタに通して得た) の振幅-周波数特性を Fig. 2.2 に示す。さらに, Fig. 2.3 に相関係数の異なる7種類 ($r = 1, 2/3, 1/3, 0, -1/3, -2/3$ および -1) の白色雑音対の相互相関関数を示す。

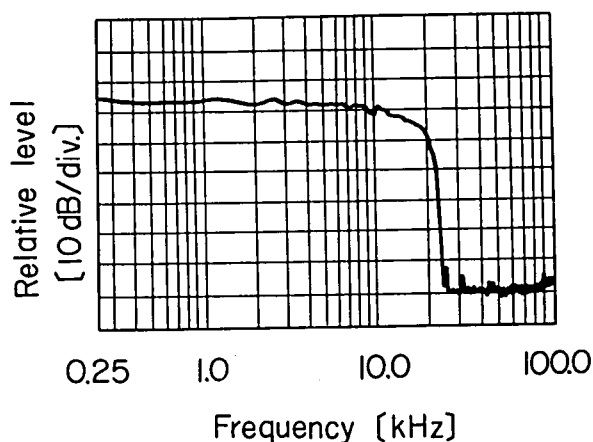


Fig. 2.2 Power spectrum of white noise.

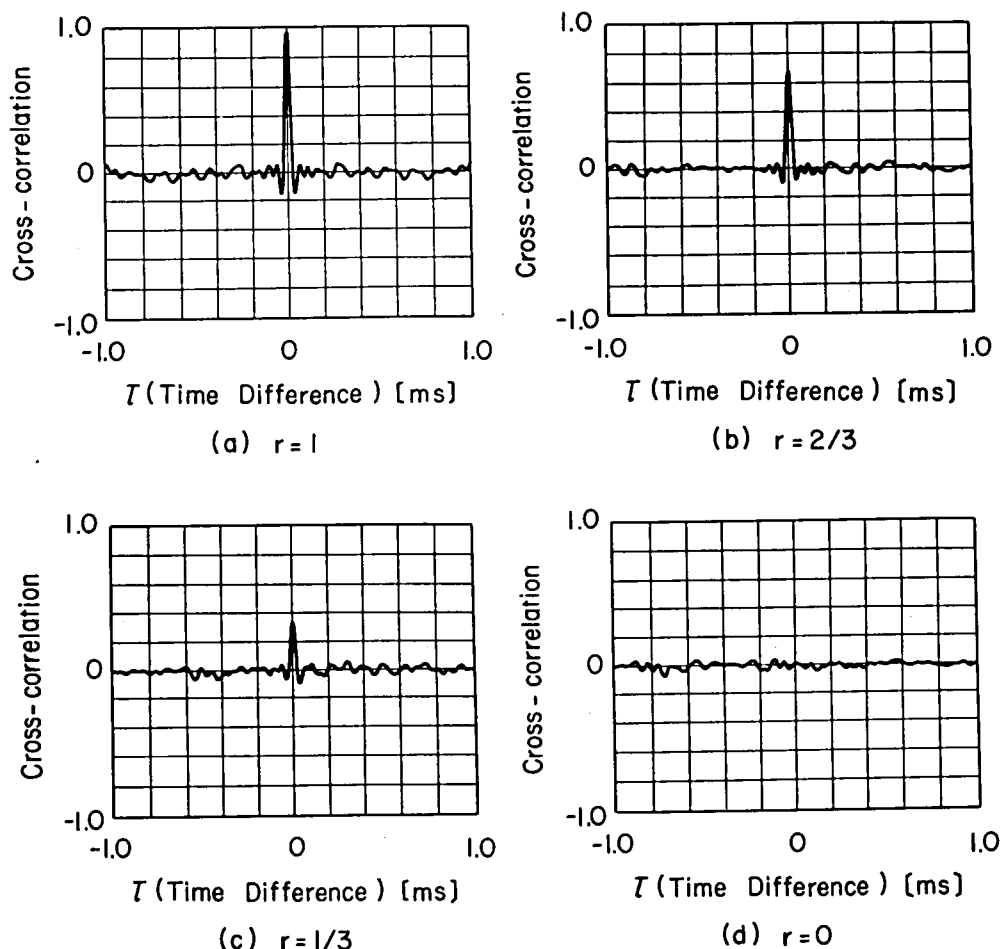


Fig. 2.3 (a to d) The cross-correlation functions corresponding to $r=1, 2/3, 1/3, 0, -1/3, -2/3$, and -1 .

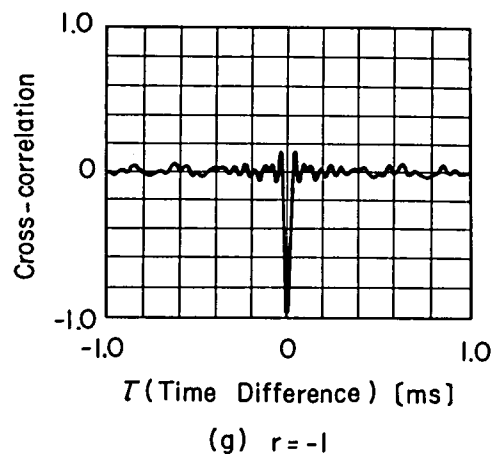
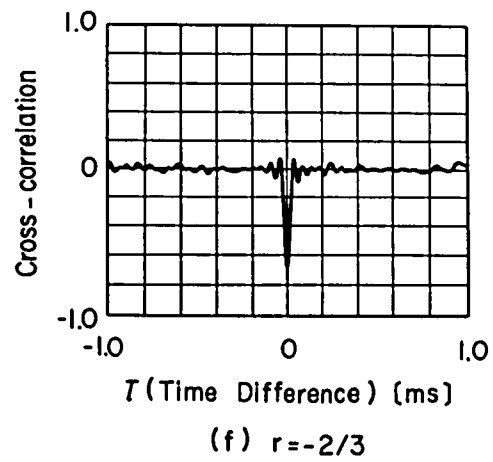
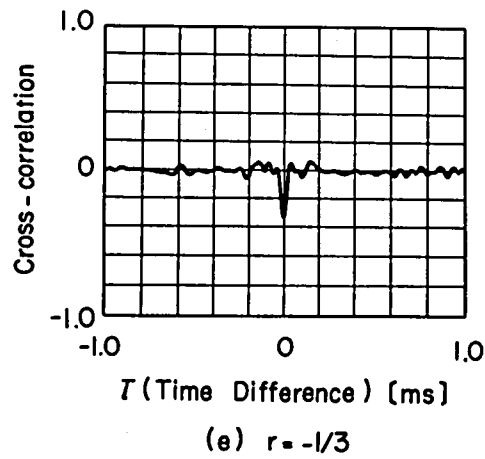


Fig. 2.3 (e to g) The cross-correlation functions corresponding to $r=1$, $2/3$, $1/3$, 0 , $-1/3$, $-2/3$, and -1 .

2.4 結言

2チャンネル音響信号の相互相関関数と相関係数を定義した。さらに、2チャンネル音響信号として本研究で主として用いた、相関係数の異なる白色雑音対について述べた。

第3章 2チャンネル音響信号の相関係数とヘッドホン受聴時における 音像の空間的印象⁽⁷⁰⁾

3. 1 概観

ヘッドホン受聴では、音像が頭内に定位するという欠点はあるが、両耳における音響信号の物理的な差異を明確に規定できる。そこで、まずヘッドホン受聴時における音像の空間的印象を規定する心理的要因を明らかにする。

Licklider⁽⁵⁹⁾およびChernyakら⁽⁶¹⁾はヘッドホン受聴時における白色雑音対の音像の頭内での拡がりかたをイラストで示し、相関係数が0の場合には音像が両耳に分離し拡がることを示した。また、穴沢ら⁽⁶³⁾はヘッドホン受聴時における帯域雑音対の音像は相関係数が正の範囲では相関係数が小さくなるほど拡がることを示した。

このように2チャンネル音響信号の相関係数が音像の拡がり感によく対応することを指摘する研究は比較的多いが、相関係数の変化が音像の拡がり感のほかにもどのような効果を与えているのかは明らかにされていない。また、相関係数の異なる白色雑音対を相関係数が負の場合まで含めて系統的に調べた研究は見当たらない。

そこで、本章で相関係数の異なる白色雑音対およびそれを帯域制限した雑音対をヘッドホン受聴し、音像の空間的印象を規定する物理的要因および心理的要因を明らかにする。

3. 2 音像の空間的印象に関する類似性実験と分析

3. 2. 1 音響信号および実験方法

音響信号には相関係数 r を 1, 2/3, 1/3, 0, -1/3, -2/3 および -1 とした 7 種類の白色雑音対と、これらの白色雑音対をフィルタに通して得られる低域雑音対 (1 kHz以下)、中域雑音対 (1 - 3 kHz) および高域雑音対 (3 kHz以上) を用いた。各雑音対の継続時間は 1 秒、立ち上がりおよび立ち下がり時間は 50 ms とし、1 秒間隔で周波数帯域が等しく、相関係数のみ異なる 2 種類の雑音対を提示した。なお、雑音対の強さはいずれの場合も約 60 dBSL (Sensation Level; dBSL は感覚レベルの単位で音の最小可聴値が 0 dB である) で一定に保った。

実験はヘッドホン (Beyer社製 D T 48) 受聴により行った。被験者は正常な両耳聴力

を有する成人2名
で、一対比較によ
り音像の空間的印
象に関する類似性
判断 (Table 3.1
に示す5段階評価)
を相関係数の異な
る7種類の雑音対
のすべての組み合
わせ (42通り) に
ついて行った。

Table 3.1 Categories for similarity judgments.

Spatial impressions of two sound images are
5: not different.
4: a little different.
3: different.
2: fairly different.
1: extremely different.

3. 2. 2 分析方法：多次元尺度構成法 (MDS：付録1参照)

2名の被験者の判断はほぼ同じ傾向を示していたので、2名の判断の合計値を用いて音像の空間的印象に関する類似性マトリックス (比較される2つの対象が似ているほど、それに対応する要素が大きな値をとるマトリックス) を作成し、それをKruskalの多次元尺度構成法 (Multidimensional Scaling：以下MDSと略す) (73)(74)で分析した。このMDSのプログラムはミシガン大学によって開発されたプログラムパッケージOSIRISの中の1つで、使用者が任意に初期布置を与えることができる。KruskalのMDSによる解は次元を一定とした場合でも一意的には定まらず、初期布置によっても変わり得るので数種類の初期布置を与え、それらの中でストレス (2つの対象の類似性が大きくなるにしたがって対象間の距離が減少する関係からのずれを表す指標で、ストレスが小さいほどデータと布置の適合が良いことを意味する) が最小となった解を採用した。

3. 2. 3 実験結果

結果をFig. 3.1に示す。●印は各音像の心理空間上の位置を示し、添字はその音響信号の相関係数である。いずれの場合も各音像はストレス0で2次元知覚空間上に布置でき、音像の空間的印象が何等かの2つのほぼ独立した心理的要因に依存していることが分かる。MDSによる分析では各音像の心理的距離関係のみが結果として得られるの

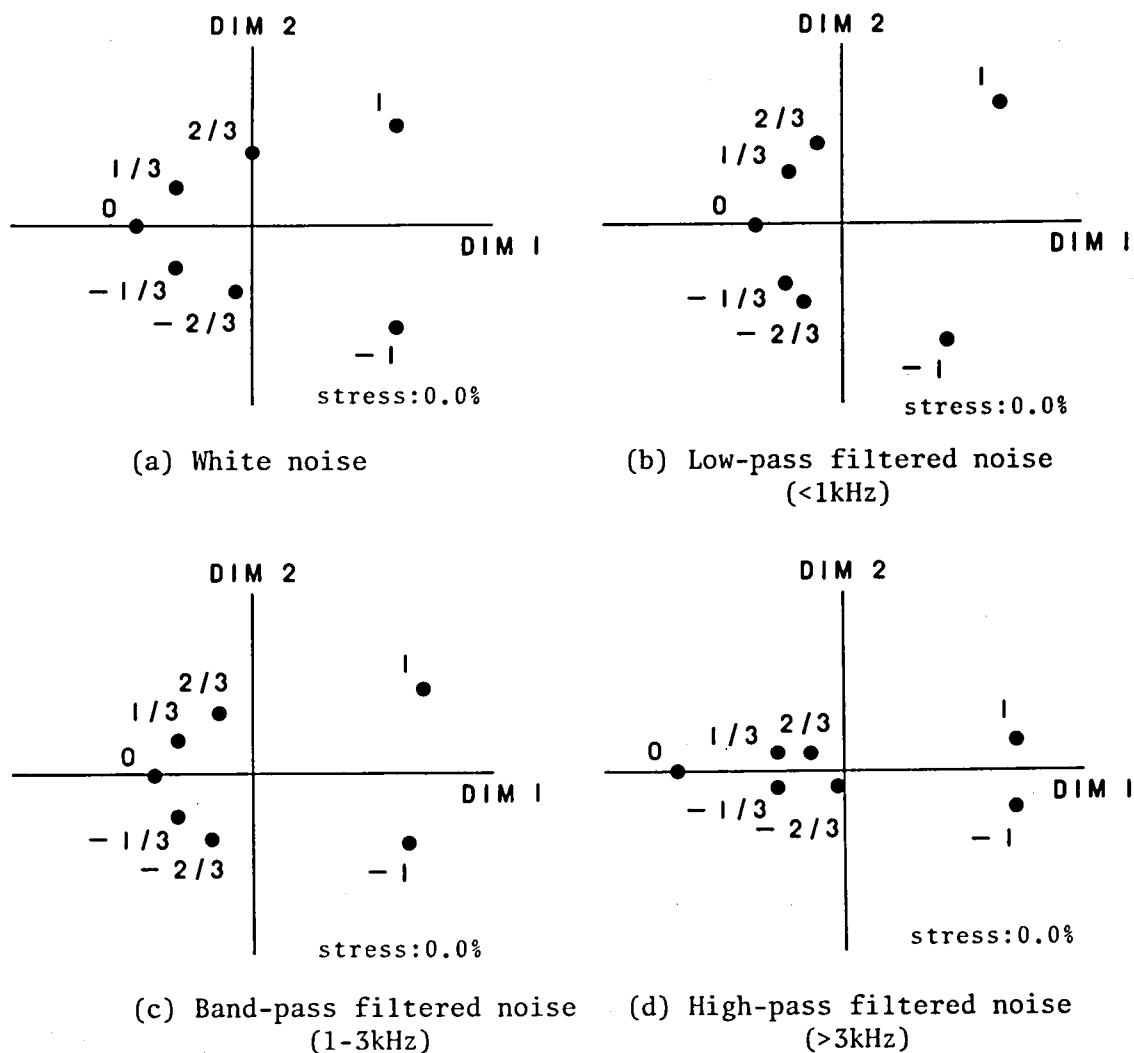


Fig.3.1 Two-dimensional configurations of (a) white noises, (b) low-pass-filtered noises (<1 kHz), (c) band-pass-filtered noises (1-3 kHz), and (d) high-pass-filtered noises (>3 kHz) with the various cross-correlation coefficients. The numeral indicates the cross-correlation coefficient of noise. The stress of these configurations was zero. These configurations show that the spatial impressions of sound image depend on approximately two independent psychological factors.

で直交する2つの軸は任意に定めることができる。したがって、Fig. 3.1には物理的な解釈が容易である2つの軸を記入した。これらの図から音像の空間的印象を規定する2つの物理的要因はI軸およびII軸に対応してそれぞれ相関係数の絶対値および相関係数そのもの（符号まで含めた値）であると解釈することができる。また、II軸方向の差は周波数帯が高くなるにしたがって小さくなる傾向のあることが分かった。

3.3 音像の空間的印象を規定する心理的要因

本節はFig. 3.1のI軸およびII軸に対応する心理的要因の意味を明らかにすることを目的とする。

3.3.1 実験方法

Fig. 3.1の2つの軸に対応する心理的要因を明らかにする目的で、相関係数の異なる7種類の白色雑音対を用いて以下の実験を行った。予備実験において被験者は頭内定位している音像の空間的印象の差として音像の拡がり感、上下方向感および前後方向感を指摘したので、一対比較により、どちらの音像がより

- (A) 拡がっているか (拡がり感)
- (B) 上方に知覚されるか (上下方向感)
- (C) 前方に知覚されるか (前後方向感)

の判断を行った。ただし、いずれの場合にも同程度であるという判断を許した。被験者がどちらか一方の白色雑音対を選択した場合にはその白色雑音対に1点を与え、同程度であると判断した場合には両白色雑音対に対してそれぞれ0.5点を与えた。なお、実験は繰り返し2回行った。

3.3.2 分析方法

音像の拡がり感および上下方向感に関しては、被験者の判断はほぼ同様な傾向を示したので、2名の判断の合計値を用いて類似性マトリックスを作成し、KruskalのMDSで分析した。音像の前後方向感に関しては被験者間の判断に大きなばらつきがあったこと、繰り返し行った実験においても被験者ごとの判断が安定していなかったことなどの理由で分析は行わなかった。なお、類似性マトリックスの作成方法は実験結果の項で述べる。

Table 3.2 Judgments matrix. Elements indicate the total score showing that noises in the left-most column were judged wider than those in the top row. The diagonal element is decided to be 4.0, which is the mean value of 50 percentage. The percentages in the last column show that the noises in the left-most column were judged wider than the others.

r	1	2/3	1/3	0	-1/3	-2/3	-1	%
1	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	8.3
2/3	8.0	4.0	3.5	2.0	2.5	6.5	8.0	63.5
1/3	8.0	4.5	4.0	3.5	4.0	6.5	8.0	71.9
0	8.0	6.0	4.5	4.0	4.5	7.5	8.0	80.2
-1/3	8.0	5.5	4.0	3.5	4.0	7.5	8.0	76.0
-2/3	8.0	1.5	1.5	0.5	0.5	4.0	8.0	41.7
-1	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	8.3

3.3.3 実験

結果

(A) 拡がり感

2名の被験者による判断の合計値を Table 3.2に示す。

Table 3.2はいわゆる星取り表であり、対角行列は50%値の4.0としている。また、右欄には各白色雑音対が他の白色雑音対よりもより音像が広がっていると判

Table 3.3 Correlation coefficients for seven noises concerning the width of the sound image. Elements were calculated by using the 14 dimensional vectors consisted of the column and the row of Table 3.2. As the correlation coefficient increases, the degree of the width of sound image becomes more similar.

r	2/3	1/3	0	-1/3	-2/3	-1
1	0.10	-0.18	-0.42	-0.29	0.65	1.00
2/3		0.94	0.85	0.91	0.82	0.10
1/3			0.96	0.98	0.63	-0.18
0				0.99	0.41	-0.42
-1/3					0.53	-0.29
-2/3						0.65

断された割合を示している。

音像の拡がり感に関する心理尺度をMDSによる分析で構成するためには、音像の拡がり感に関する何等かの類似性マトリックスを必要とし、Table 3.2をそのまま分析することはできない。そのため各白色雑音対についてTable 3.2の各行および各列からなる14次元ベクトルを考えこれらの相関係数を求めた。結果を

Table 3.3に示す。Table 3.3に示す相関係数が大きいほど2つの音像の拡がり感が似ていることを示しているのでTable 3.3は各音像の拡がり感に関する類似性マトリックスと考えることができる。KruskalのM

D Sによる分析を行うためには類似性マトリックスの要素は順序尺度でよいので、Table 3.3の相関係数の小さいものから順次番号を割り当て、順序尺度で表された類似性マトリックスを作成した。

このマトリックスをKruskalのMDSで分析した。結果をFig. 3.2(a)に示す。各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置でき、音像の拡がり感は各被験者に共通な1つの心理的な軸となっていることが分かる。Table 3.2と考え合わせれば、白色雑音対の相関係数の絶対値が小さくなるほど音像はより拡がって知覚されることが分かる。なお、被験者は $r = 0$ の音像はほぼ両耳の間隔まで拡がっていることを指摘した。これは、Licklider⁽⁵⁹⁾およびChernyakら⁽⁶¹⁾の結果と一致している。

(B) 上下方向感

拡がり感とまったく同様な方法で、2名の判断の合計値を用いて上下方向感の分析を行った。結果をFig. 3.2(b)に示す。各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置でき、音像の上下方向感も各被験者に共通な1つの心理的な軸となっていることが分かる。なお、音像をより上方に知覚した割合は $r = 1$ および0の音像に対してそれぞれ72.2%

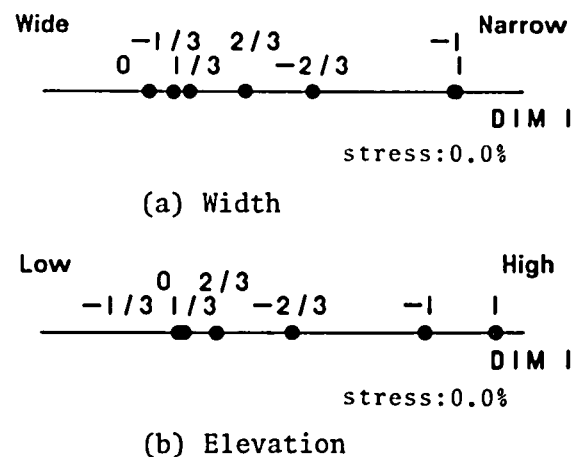


Fig.3.2 One-dimensional configurations of white noises concerning (a) width and (b) elevation of sound image, respectively.

および43.8%で、最も割合の小さい場合が $r = -1/3$ の音像に対する37.5%である。したがって、相関係数の絶対値が大きくなるほど音像は上方に定位する傾向のあることが分かった。

3.4 検討

3.4.1 音像の空間的印象を規定する心理的要因

Fig. 3.1(a)のI軸とFig. 3.2の(a)および(b)の軸との相関係数はいずれも0.95, Fig. 3.1(a)のII軸とFig. 3.2の各軸との相関係数はそれぞれ-0.11および0.03である。したがって、Fig. 3.1のI軸に対応する心理的要因は音像の拡がり感または上下方向感であると解釈することができる。ただし、音像の拡がり感は相関係数を変えることによって大きく変化するが、音像の上下方向感も相関係数を変えても音像の拡がり感ほどは大きく変化しないことから、Fig. 3.1のI軸の主要な心理的要因は音像の拡がり感であると考えることができる。なお、被験者は $r = 1$ の音像は頭内のほぼ中央の比較的上方に定位すること、 $r = -1$ の音像は後頭部付近に定位することを指摘したので、Fig. 3.1のII軸は定位の差に関連があると思われるが、ここで行った実験からは、II軸に対応する明確な心理的要因を見出すことはできなかった。

3.4.2 音像の空間的印象に及ぼす周波数帯の効果

Fig. 3.1は雑音対の周波数帯が高くなるにしたがってII軸方向に対応する心理的要因の差が小さくなることを示している。そこで、II軸方向の差がより大きくなり、容易にII軸に対応する心理的要因を見出すことができると考えられる300Hz以下の成分からなる低域雑音対を用いて音像の空間的印象に関する類似性実験を行った。MDSによる分析結

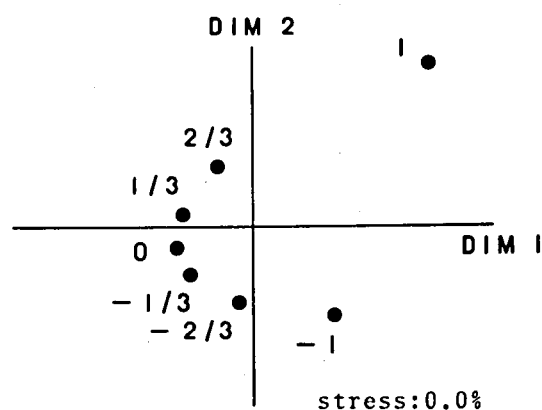


Fig.3.3 Two-dimensional configuration of low-pass-filtered noises (<300 Hz).

果を Fig. 3.3 に示す。Fig. 3.3 のⅡ軸方向の差は Fig. 3.1(b)と比べて必ずしも大きくはなく、Fig. 3.1 のⅡ軸に対応する心理的要因を見い出すことはできなかった。しかし、 $r = -1$ の音像が比較的左側に布置されることは分かった。このことは、 $r = -1$ の低域雑音対（300 Hz以下）の音像は比較的拡がって知覚されるという被験者の指摘に一致している。

3.4.3 相関係数の弁別に及ぼす周波数帯の効果

音像の空間的印象に関する類似性実験を周波数帯域ごとに行ったので、Fig. 3.1 には周波数帯の違いによるⅠ軸方向の差はほとんど現われていない。しかし、被験者は周波数帯が高くなるにしたがって各音像の空間的印象の差が小さくなることを指摘した。そこで、音像の空間的印象の弁別がどの程度の低域成分を必要とするのかを明らかにする目的で、白色雑音対を高域通過フィルタに通して得られる高域雑音対を用いて、音像の空間的印象に関する弁別実験を行った。高域通過フィルタの遮断周波数は 0.0, 1.0, 1.9, 3.2, 4.0, 8.1 および 12.8 kHz とした。実験には音像の空間的印象が互いに最も異なる $r = 1$ 、0 および -1 の雑音対を用いた。実験は 1 : 2 点比較法⁽⁷⁵⁾によって行い、周波数帯域の等しい雑音対を 1 秒間隔で 3 回連続して提示した。なお、雑音対の継続時間は 1 秒、立ち上がりおよび立ち下がり時間は 50ms とし、強さを約 60dB SL で一定に保った。実験はヘッドホン受聴で行い、被験者は第 1 音を標準雑音対とみなし、第 2 音または第 3 音のいずれの雑音対が標準雑音対と等しいのかを判断した。すべての組み合わせ（21通り）についていずれの場合も 12 回の判断を行い、2 名の被験者による合計 24 回の

Table 3.4 Detectability of the difference between the two sound image.

Cross-Correlation Coefficient	HPF [kHz]						
	0.0	1.0	1.9	3.2	4.0	8.1	12.8
1 and 0	*	*	*	*	*	*	*
-1 and 0	*	*	*	*	*	*	
1 and -1	*	*					

* : 5% significance level

判断値を用いて片側検定を行った⁽⁷⁶⁾。各音像間の弁別が有意水準5%で可能な場合を Table 3.4に*印で示す。

Table 3.4から $r = 1$ と 0 および $r = -1$ と 0 の音像はいずれも 8.1 kHz 以上の成分からなる高域雑音対においても弁別できることが分かる。また, Fig. 3.1 の II 軸方向の差は低い周波数成分を含む雑音対に対してのみ知覚できることが分かった。なお, Fig. 3.1(d)は, 3 kHz 以上の高域雑音対において $r = 1$ と -1 の音像の空間的印象に多少差があることを示しているが, この差は有意水準5%では弁別できないことが明らかになった。

3.5 結言

相関係数の異なる白色雑音対およびそれを帯域制限した雑音対をヘッドホン受聴した場合の音像の空間的印象を規定する物理的要因および心理的要因を探究した。その結果, 音像の空間的印象を規定する物理的要因は相関係数の絶対値および相関係数そのものであることを示した。相関係数の絶対値に対応する主要な心理的要因は音像の拡がり感であり, 相関係数の絶対値が小さくなるほど音像の拡がることを明らかにした。これは従来から指摘されていた「相関係数が小さくなるほど音像の拡がり感は大きくなる」ことに近いが, 「音像の拡がり感は相関係数そのものに対応するのではなくその絶対値に対応する」という新しい結果である。また, 音像の拡がり感の差異は約 8 kHz 以上の成分からなる高域雑音対においても知覚できることを示した。さらに, 相関係数の絶対値が大きくなるほど音像は上方へ定位する傾向のあることを示した。一方, 相関係数そのものに対応する明確な心理的要因を見い出すことはできなかった。

第4章 2チャンネル音響信号の相互相関関数とヘッドホン受聴時における 音像の空間的印象(70)

4.1 概観

2チャンネル音響信号の相関係数が同じであっても相互相関関数の異なる場合には音像の空間的印象に差異を生ずる場合があると考えられる。そこで、相互相関関数の異なる白色雑音対の音像の空間的印象を規定する物理的要因および心理的要因を明らかにする。

4.2 実験方法および分析方法

相互相関関数の異なる白色雑音対としては無数の種類が存在するが、被験者前方±30°方向に置いたスピーカ配置で音を聴取するとき、左右のスピーカからそれぞれ右および左の耳へ約250μs遅れた遅延信号がクロストークとして生ずることを考慮して、Fig. 4.1 に示す合成方法で得ることのできる白色雑音対を実験に用いた。

白色雑音対の相互相関関数 $r(\tau)$ は (2.1)式より

$$r(\tau) = \frac{\pm \overline{n_1^2} \cdot \delta(\tau + \tau_D) \pm \overline{n_2^2} \cdot \delta(\tau - \tau_D)}{(\overline{n_1^2} + \overline{n_2^2}) \cdot \delta(0)} \quad (4.1)$$

となる。ここに $\delta(\tau)$ はディラックの δ 関数であり、 $\overline{n_1^2}$ および $\overline{n_2^2}$ はそれぞれ白色雑音 WN1 および WN2 を音量減衰器 A1 および A2 により減衰した後の2乗平均電圧、 τ_D は遅延回路の遅延時間である。また、複号はクロストーク成分を付加するときの極性によって4通りの組み合わせをとり、第1項および第2項の複号はそれぞれクロストーク成分を右および左の音響信号へ付加するときの極性に対応する。(4.1) 式から分かるように、 τ_D および $\overline{n_1^2}$ 、 $\overline{n_2^2}$ の組み合わせおよびクロストーク成分

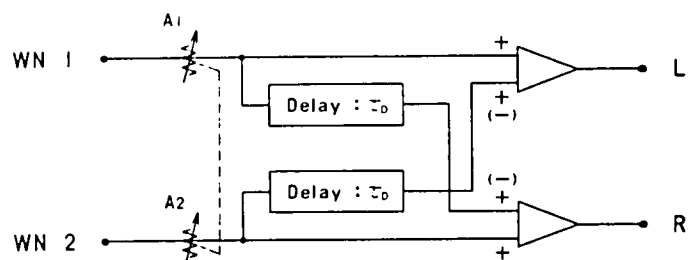


Fig. 4.1 Block diagram for synthesizing white noises with the various cross-correlation functions.

を付加するときの極性によって白色雑音対の相互相関関数は無数の変化を示す。そこで、各要因ごとの効果をより明確にするために、以下に示すように7種類の白色雑音対からなる群を6種類構成し、群単位で実験を行った。

実験はヘッドホン(DT48)受聴により行った。被験者は正常な両耳聴力を有する成人で、第1, 第2および第3白色雑音対群に対しては5名, 第4, 第5および第6白色雑音対群に対しては4名である。先に行った実験とまったく同様に、音像の空間的印象に関する類似性判断を5段階評価で行った。

各被験者の判断はほぼ同じ傾向を示したので、その合計値を用いて音像の空間的印象に関する類似性マトリックスを作成し、それをKruskalのMDSで分析した。

4.3 音響信号および実験結果

i) 第1白色雑音対群：相互相関関数の基本的な形と音像の空間的印象の対応関係を明らかにする目的で、 $\overline{n_1^2} = \overline{n_2^2}$, $\tau_0 = 0$ または $200\mu\text{s}$ とし、クロストーク成分を付加するときの極性の組み合わせを4通り用

いて7種類の白色雑音対を合成した。

Fig. 4.2 に7種類の白色雑音対の相互相関関数を示す。記号1, 0および-1で示す白色雑音対は $\tau_0 = 0\mu\text{s}$ として合成した場合であり、これは相関係数の異なる白色雑音対と同一である。記号0(+,+), 0(-,+), 0(+,-)および0(-,-)で示す白色雑音対は $\tau_0 = 200\mu\text{s}$ として合成した場合で、記号の数字部分は相関係数を表し、括弧内の左側および右側の正または負の符号は $\tau = -200\mu\text{s}$ および $\tau = 200\mu\text{s}$ の位置における相互相関関数の値が1/2または-1/2であることを表す。Fig. 4.3 は0(+,+), 0(-,+), 0(+,-)および0(-,-)の白色雑音対の相互相関

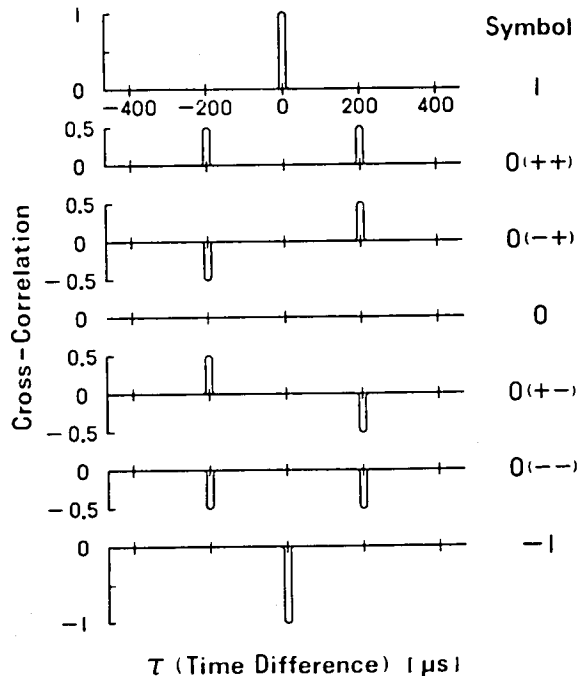


Fig. 4.2 The cross-correlation functions corresponding to the 1st white noises group.

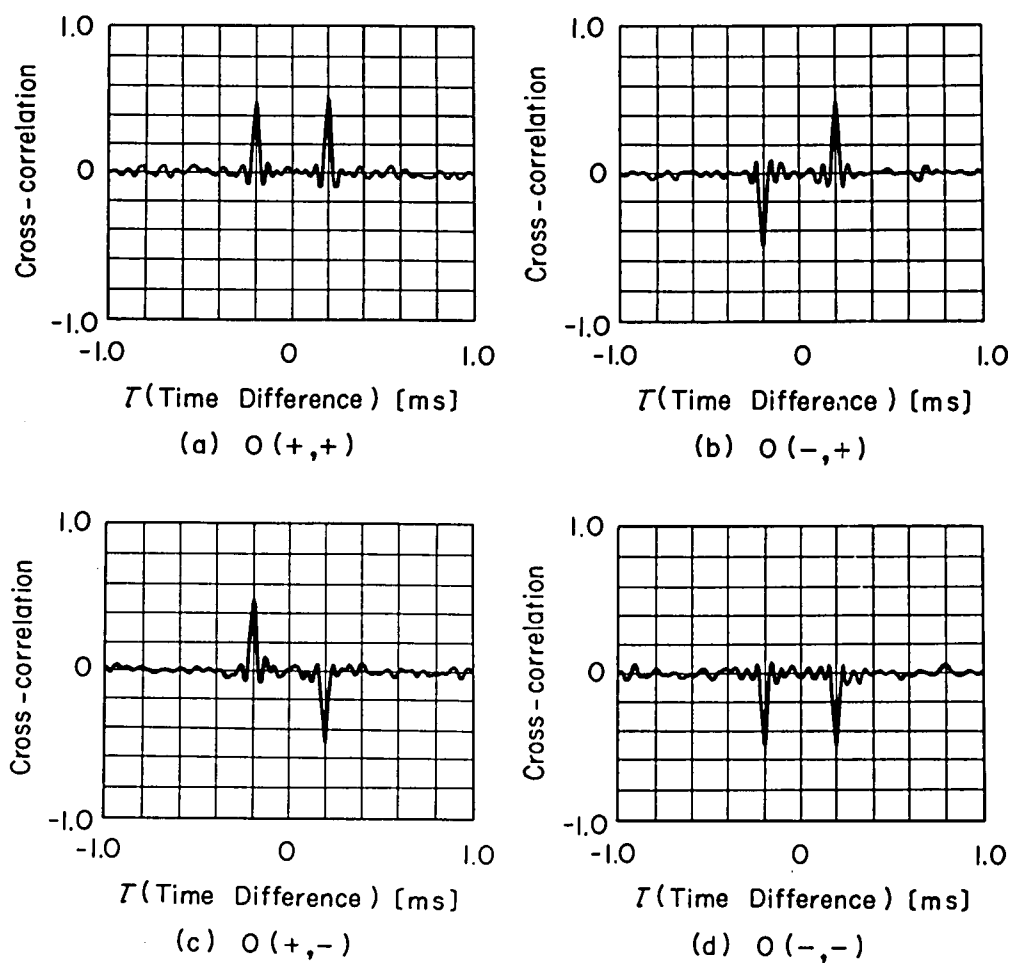


Fig. 4.3 The measured cross-correlation functions corresponding to $0(+,+)$, $0(-,+)$, $0(+,-)$, and $0(-,-)$.

関数の測定値である。

なお、各白色雑音対の提示条件（継続時間など）は第3章とまったく同様である。

分析結果を Fig. 4.4 に示す。各音像はストレス0で3次元知覚空間上に布置でき、音像の空間的印象が何等かの3つのほぼ独立した心理的要因に依存していることが分かる。物理的にはⅠ軸は相互相関関数の絶対値の最大値に、Ⅱ軸はほぼ相互相関関数のピーク値そのもの（符号まで含めた値）に、Ⅲ軸は相互相関関数の形の左右非対称性に対応すると解釈することができる。

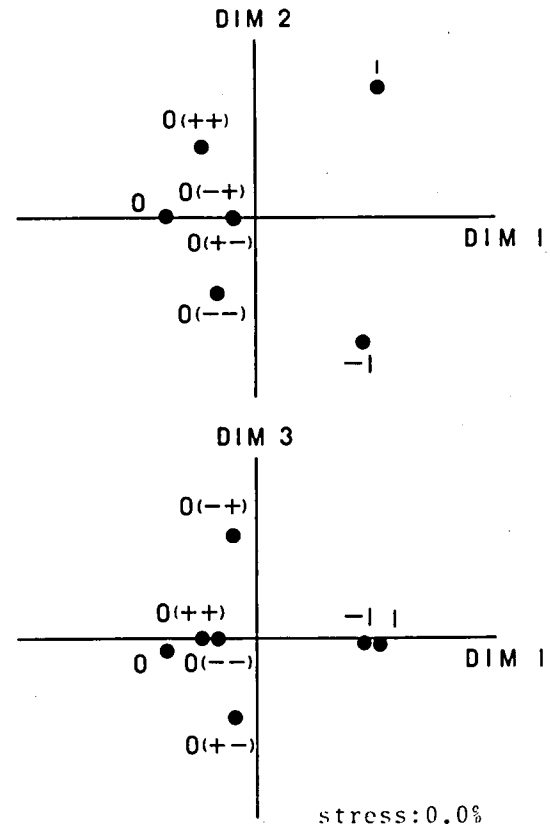


Fig. 4.4 Three-dimensional configuration of 1st white noises group.

ii) 第2白色雑音対群：相互相関関数のピーク位置が音像の空間的印象にどのような効果を及ぼすかを明らかにする目的で、 $\bar{n}_1 = \bar{n}_2$, $\tau_0 =$

0, 200, 400, 600, 800, 1000 および 1200 μs とし、クロストーク成分を左右いずれも正で付加して7種類の白色雑音対を合成した。白色雑音対の相互相関関数は(4.1)式より

$$r(\tau) = [\delta(\tau + \tau_D) + \delta(\tau - \tau_D)] / [2 \cdot \delta(0)] \quad (4.2)$$

となる。ただし、 τ_0 は上記の値であり、 $\tau_0 = 200 \mu\text{s}$ のときの相互相関関数の形は Fig.

4.2 の 0(+,+) と同一である。分析結果を Fig. 4.5 に示す。図中の添字は遅延時間 τ_0 [μs] の値である。各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置できること、 τ_0 が 600 μs から 1200 μs の範囲では音像の空間的印象にほとんど差のないことが分かった。

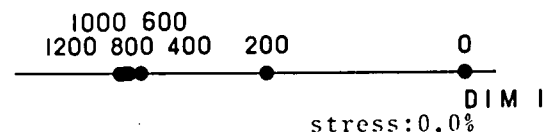


Fig. 4.5 One-dimensional configuration of the 2nd white noises group.

iii) 第3白色雑音対群: Fig.

4.5 は $\tau_0 = 0$ と $200\mu\text{s}$ の音像の空間的印象の差異が非常に大きいことを示している。そこで、相互相関関数のピークの位置が $|\tau| \leq 200\mu\text{s}$ の範囲にある場合をより詳細に調べる目的で、 $\tau_0 = 0, 33, 67, 100, 133, 167$ および $200\mu\text{s}$ とし、第2群と同様な方法で7種類の白色雑音対を合成した。

分析結果を Fig. 4.6 に示す。図中の添字は遅延時間 τ_0 [μs] の値である。Fig. 4.5 および Fig. 4.6 から $\bar{n}_1^2 = \bar{n}_2^2$ で、クロストーク成分をいずれも正で付加した場合には各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置できること、 τ_0 が小さくなるほど、音像の空間的印象は大きく変化することが明らかになった。

iv) 第4白色雑音対群: 相互相関関数が2つの大きさの異なる正のピークを持つ場合、音像の空間的印象にどのような効果を及ぼすかを調べる目的で、 \bar{n}_1^2 と \bar{n}_2^2 の比を変えて、 $\tau_0 = 200\mu\text{s}$ として7種類の白色雑音対を合成した。ただし、クロストーク成分は左右いずれも正で付加した。白色雑音対の相互相関関数は (4.1) 式より

$$r(\tau) = [r_{-\tau_D} \cdot \delta(\tau + \tau_D) + r_{\tau_D} \cdot \delta(\tau - \tau_D)] / \delta(0) \quad (4.3)$$

となる。ただし、 $r_{-\tau_0} = \bar{n}_1^2 / (\bar{n}_1^2 + \bar{n}_2^2)$ 、 $r_{\tau_0} = \bar{n}_2^2 / (\bar{n}_1^2 + \bar{n}_2^2)$ である。白色雑音対の

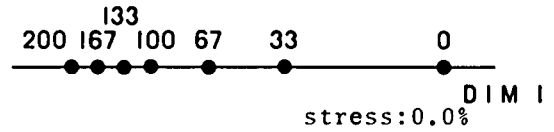


Fig. 4.6 One-dimensional configuration of the 3rd white noises group.

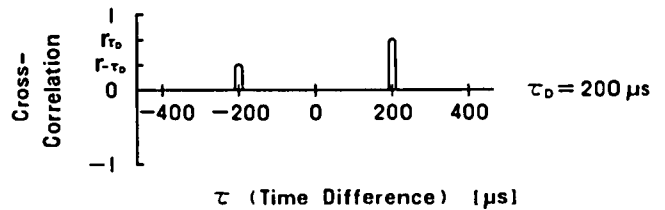


Fig. 4.7 The cross-correlation function corresponding to the 4th white noises group.

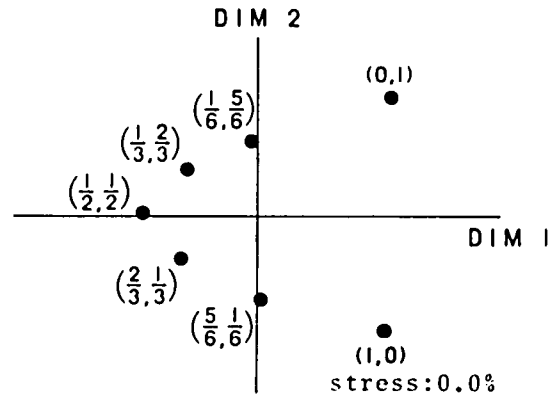


Fig. 4.8 Two-dimensional configuration of the 4th white noises group.

相互相関関数を Fig. 4.7 に示す。1つの白色雑音対を (r_{τ_0}, r_{τ_0}) で表すことにすれば、7種類の白色雑音対は $(0, 1)$, $(1/6, 5/6)$, $(1/3, 2/3)$, $(1/2, 1/2)$, $(2/3, 1/3)$, $(5/6, 1/6)$ および $(1, 0)$ である。

分析結果を Fig. 4.8 に示す。図中の添字は (r_{τ_0}, r_{τ_0}) である。各音像はストレス0で2次元知覚空間上に布置できることが分かった。また、物理的にはI軸は相互相関関数の絶対値の最大値に、II軸は r_{τ_0} (または $r_{-\tau_0}$) に対応すると解釈することができる。

v) 第5白色雑音対群：相互相関関数が正および負のピークを持つ場合、音像の空間的印象にどのような効果を及ぼすかを調べる目的で、 \bar{n}_1^2 と \bar{n}_2^2 の比を変えて、 $\tau_0 = 200\mu s$ として7種類の白色雑音対を合成した。ただし、クロストーク成分を右は負で、左は正で付加した。白色雑音対の相互相関関数は (4.3) 式と同じである。ただし、 $r_{\tau_0} = -\bar{n}_1^2 / (\bar{n}_1^2 + \bar{n}_2^2)$ 、 $r_{-\tau_0} = \bar{n}_2^2 / (\bar{n}_1^2 + \bar{n}_2^2)$ である。7種類の白色雑音対は、前述の表記法を用いれば、 $(0, 1)$, $(-1/6,$

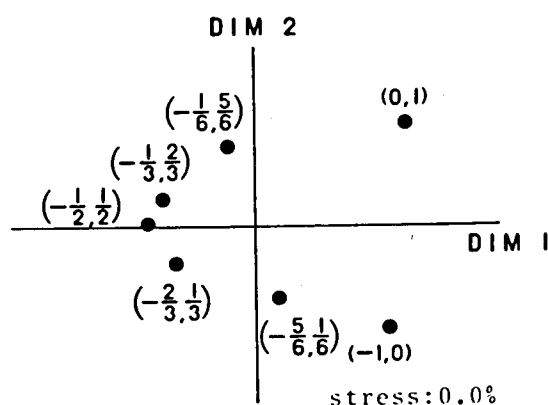


Fig. 4.9 Two-dimensional configuration of the 5th white noises group.

分析結果を Fig. 4.9 に示す。各音像はストレス0で2次元知覚空間上に布置できること、ほぼ第4群による結果と同じであることが分かった。

vi) 第6白色雑音対群：相互相関関数が2つの大きさの異なる負のピークを持つ場合、音像の空間的印象にどのような効果を及ぼすかを調べる目的で、 \bar{n}_1^2 と \bar{n}_2^2 の比を変えて、 $\tau_0 = 200\mu s$ として7種類の白色雑音対を合成した。ただし、クロストーク成分を左右いずれも負で付加した。白色雑音対の相互相関関数は (4.3) 式となる。ただし、 $r_{\tau_0} = -\bar{n}_1^2 / (\bar{n}_1^2 + \bar{n}_2^2)$ 、 $r_{-\tau_0} = -\bar{n}_2^2 / (\bar{n}_1^2 + \bar{n}_2^2)$ である。7種類の白色雑音対は、前述の表記法を用いれば $(0, -1)$, $(-1/6, -5/6)$, $(-1/3, -2/3)$, $(-1/2, -1/2)$, $(-2/3, -1/3)$, $(-5/6, -1/6)$ および $(-1, 0)$ である。なお、第4、第5および第6群の

r_{τ_0} と r_{τ_0} には, $|r_{\tau_0}| + |r_{\tau_0}| = 1$ の関係が成り立っている。

分析結果をFig. 4.10に示す。この場合においても, 各音像はストレス0で2次元知覚空間上に布置できること, ほぼ第4および第5群による分析結果と同じであることなどが分かった。

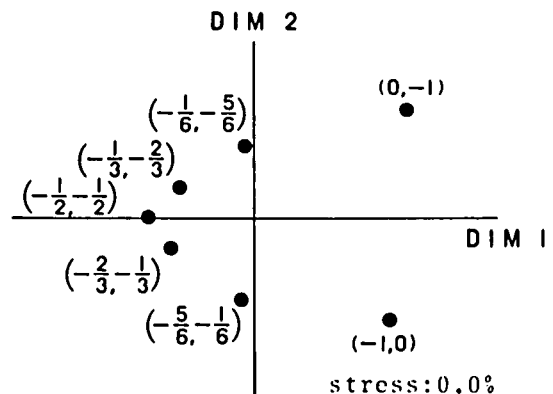


Fig. 4.10 Two-dimensional configuration of the 6th white noises group.

4.4 音像の空間的印象を規定する心理的要因

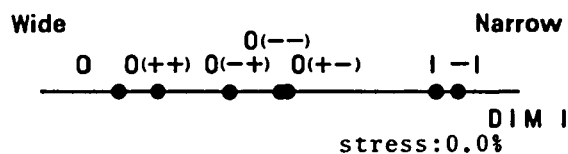
Fig. 4.4, Fig. 4.5, Fig. 4.6, Fig. 4.8, Fig. 4.9 および Fig. 4.10の各軸に対応する心理的要因を明らかにする目的で, 白色雑音対の群単位で以下の実験を行った。

被験者は白色雑音対の音像の空間的印象の差として, 第1群では音像の拡がり感, 上下方向感および左右方向感を, 第2および第3群では音像の拡がり感および上下方向感を, 第4, 第5および第6群では音像の拡がり感および左右方向感を指摘した。そこで, 群単位に被験者の指摘した心理的要因について一対比較実験を行った。すなわち, 音像の拡がり感, 上下方向感および左右方向感に関して, どちらの音像がより

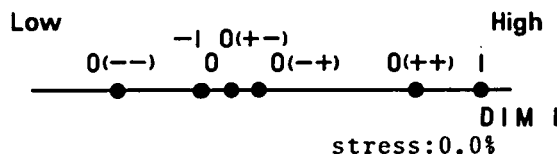
- (A) 拡がっているか (拡がり感)
- (B) 上方に知覚されるか (上下方向感)
- (C) 右に知覚されるか (左右方向感)

の判断を行った。拡がり感および左右方向感に関してはいずれの場合も被験者の判断はほぼ同じ傾向を示したのでその合計値を用いて分析し, 上下方向感に関しては被験者 (Sub.5) の判断値が他の4名の判断値と異なった傾向を示したので, 4名の合計値とSub.5の判断値とを分けて分析した。なお, 分析方法は3.3節とまったく同様である。

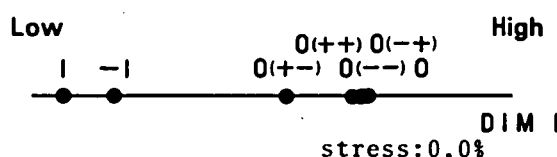
i) 第1群の分析結果をFig. 4.11に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で1



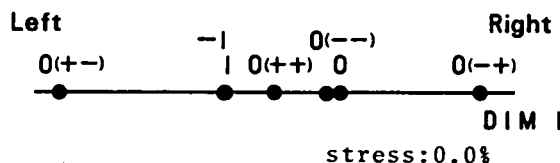
(a) Width



(b) Elevation (except Sub.5)



(c) Elevation (Sub.5)



(d) Lateral displacement

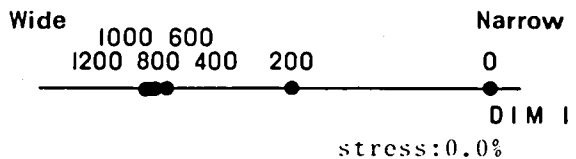
Fig. 4.11 One-dimensional configurations of the 1st white noises group concerning (a) width, (b) and (c) elevation, (d) lateral displacement of sound image, respectively.

次元知覚空間上に布置でき、音像の拡がり感および左右方向感は5名の被験者に、音像の上下方向感は4名の被験者に共通な1つの心理的な軸となっていることが分かった。また、他の1名の被験者においても音像の上下方向感は1つの心理的な軸となっている。音像をより拡がっていると判断した割合は記号-1および0で示す音像に対してそれぞれ5.0%および86.7%、音像をより右に定位していると判断した割合は0(-,+)および0(+,-)で示す音像に対してそれぞれ86.7%および11.7%である。また、音像をより上方に知覚した割合は4名の被験者の合計値では1および0(-,-)で示す音像に対してそれぞれ92.7%および28.1%、他の1名の被験者では0および1で示す音像に対してそれぞれ70.8%および13.9%である。すなわち、相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど音像の拡がること、4名の被験者においては相互相関関数のピークの値そのものが大きくなるほど音像が上方に定位する傾向のあることが分かった。さらに、0(-,+)で示す音像は右に、0(+,-)で示す音像は左に定位することが明らかになった。

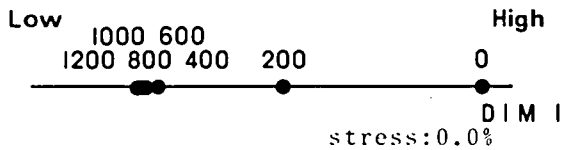
これらのことから、Fig. 4.4のI軸、II軸およびIII軸に対応する心理的要因はそれぞれ音像の拡がり感、ほぼ音像の上下方向感および音像の左右方向感であると解釈することができる。

ii) 第2群の分析結果を Fig. 4.12に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置でき、各軸と Fig. 4.5 は良く対応することが分かった。音像をより拡がっていると判断した割合は $\tau_0 = 0$ および1200 μ sの音像に対してそれぞれ0%および64.2%、音像をより上方に知覚した割合は $\tau_0 = 0$ および1200 μ sの音像に対してそれぞれ4名の被験者の合計値では95.8%および41.7%、他の1名の被験者では0%および62.5%である。これらのことから、Fig. 4.5 の軸は音像の拡がり感または上下方向感に対応すると解釈することができる。

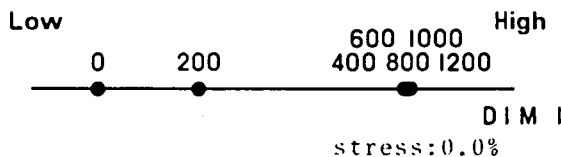
iii) 第3群の分析結果を Fig. 4.13に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置できること、Fig. 4.6 の軸の解釈も第2群の場合と等しいことが分かった。なお、音像をより拡がっていると判断した割合は $\tau_0 = 0$ および200 μ sの音像に対してそれぞれ1.7%および78.3%、音像をより上方に知覚した割合は $\tau_0 = 0$ および200 μ sの音像に対してそれぞれ4名の被験者の合計値では93.8%および32.3%、他の1名の被験者では12.5%および70.8%である。



(a) Width

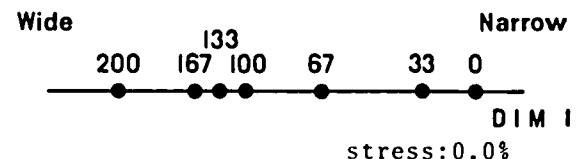


(b) Elevation (except Sub.5)

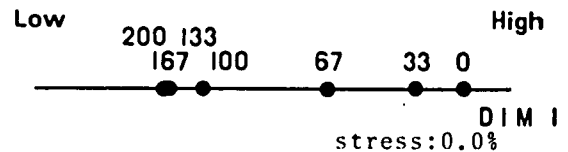


(c) Elevation (Sub.5)

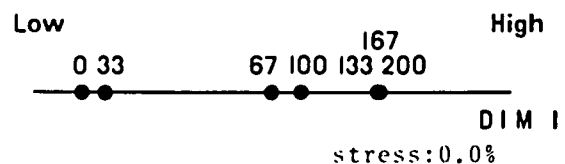
Fig. 4.12 One-dimensional configurations of the 2nd white noises group concerning (a) width, (b) and (c) elevation of sound image, respectively.



(a) Width



(b) Elevation (except Sub.5)



(c) Elevation (Sub.5)

Fig. 4.13 One-dimensional configurations of the 3rd white noises group concerning (a) width, (b) and (c) elevation of sound image, respectively.

iv) 第4群の分析結果を Fig. 4.14に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置できることが分かった。音像をより拡がっていると判断した割合は $(1, 0)$ および $(1/2, 1/2)$ で示す音像に対してそれぞれ 8.3% および 90.6%, 音像をより右に定位していると判断した割合は $(0, 1)$ および $(1, 0)$ で示す音像に対してそれぞれ 91.7% および 3.1% である。すなわち、相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど音像の拡がること、 r_{τ_0} が大きくなる（したがって r_{τ_0} が小さくなる）ほど音像は右に定位することが明らかになった。これらのことから Fig. 4.8 の I 軸および II 軸に対応する心理的要因はそれぞれ音像の拡がり感および左右方向感であると解釈することができる。

v) 第5群の分析結果を Fig. 4.15に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置できること、Fig. 4.9 の各軸の解釈も第4群の場合と等しいことが分かる。なお、音像をより拡がっていると判断した割合は $(-1, 0)$ および $(-1/2, 1/2)$ で示す音像に対してそれぞれ 6.3% および 72.9%, 音像をより右に定位していると判断した割合は $(0, 1)$ および $(-1, 0)$ で示す音像に対してそれぞれ 91.7% および 4.2% である。

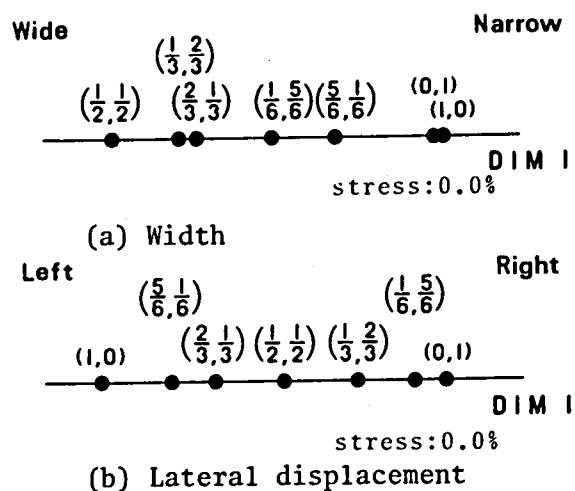


Fig. 4.14 One-dimensional configurations of the 4th white noises group concerning (a) width and (b) lateral displacement of sound image.

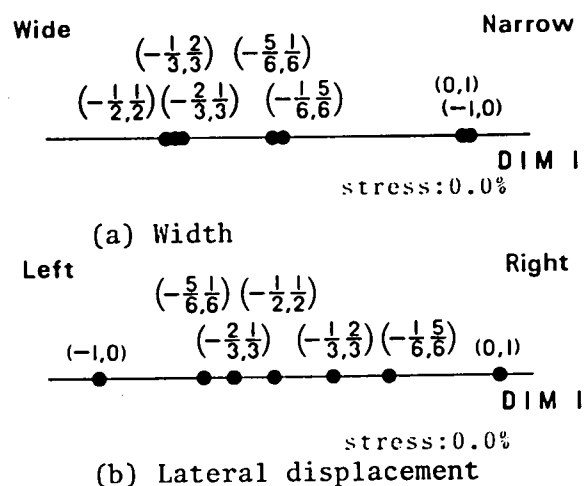


Fig. 4.15 One-dimensional configurations of the 5th white noises group concerning (a) width and (b) lateral displacement of sound image.

vi) 第6群の分析結果を Fig. 4.16に示す。この場合においても各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置できること, Fig. 4.10の各軸の解釈も第4および第5群の場合と等しいことが分かる。なお, 音像をより拡がっていると判断した割合は $(-1, 0)$ および $(-1/2, -1/2)$ で示す音像に対してそれぞれ8.3 %および84.4%, 音像をより右に定位していると判断した割合は $(0, -1)$ および $(-1, 0)$ で示す音像に対してそれぞれ86.5%および3.5%である。

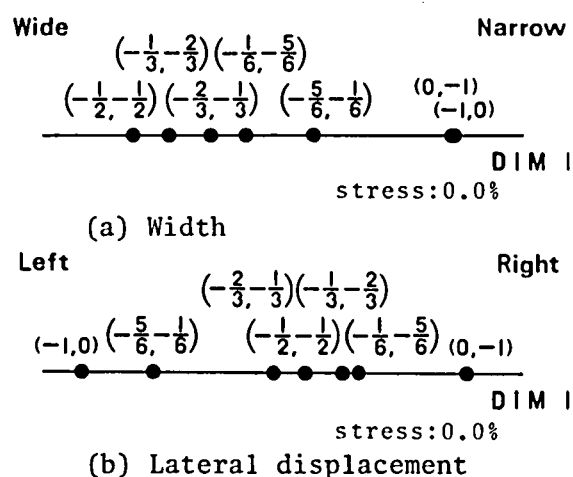


Fig. 4.16 One-dimensional configurations of the 6th white noises group concerning (a) width and (b) lateral displacement of sound image.

4. 5 検討

4. 5. 1 音像の拡がり感

第3章では音響信号の相関係数の絶対値が小さくなるほど音像の拡がり感が大きくなることを示したが, 本章ではこの結果を一般化し, 相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど音像の拡がり感が大きくなることを示した。さらに, 相互相関関数の絶対値の最大値が同じであっても, そのピークの位置が $\tau = 0$ より離れるにしたがって音像の拡がることを明らかにした。

4. 5. 2 音像の左右方向感

音像の左右方向感はチャンネル間のレベル差に依存することは明らかであるが, チャンネル間レベル差のない白色雑音対では相互相関関数の形の左右非対称性に依存することを示した。

ここで, 相互相関関数の形と音像の左右方向感との対応関係を明確に示すために, 相

互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対をヘッドホン受聴した場合の音像の左右方向感について考えてみる。このような白色雑音対の例としては、左の白色雑音が右の白色雑音より単に τ_0 遅れている場合、左の白色雑音が右の白色雑音と逆位相でしかも τ_0 遅れている場合などがある。これらの白色雑音対の相互相関関数は(2.1)式より

$$r(\tau) = \delta(\tau - \tau_D) / \delta(0) \quad (4.4)$$

または

$$r(\tau) = -\delta(\tau - \tau_D) / \delta(0) \quad (4.5)$$

となり、相互相関関数は $\tau = 0$ より右の $\tau = \tau_0$ で1または-1のピークを持つことになる。また、 τ_0 が約6~7ms以下の範囲では、これらの白色雑音対の音像は頭内正中面より右に定位することが知られている⁽⁷⁷⁾。したがって、相互相関関数を(2.1)式で定義すれば、相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対の音像の左右方向感と相互相関関数のピークの位置が視覚的によく一致し、ピークの位置が $\tau = 0$ より右(または左)にあれば音像は頭内正中面より右(または左)に定位することになる。

本章では相互相関関数が2つのピークを $\tau = \pm 200 \mu\text{s}$ で持つ場合の白色雑音対の音像の左右方向感を明らかにした。2つのピークの極性がいずれも正または負である場合は、Fig. 4.14(b) および Fig. 4.16(b) に示すように $|r_{\tau_0}| > |r_{-\tau_0}|$ ならば音像は頭内正中面より右に、逆に $|r_{\tau_0}| < |r_{-\tau_0}|$ ならば左に定位することが分かった。一方、2つのピークの極性が互いに異なり、 $r_{\tau_0} > 0$ 、 $r_{-\tau_0} < 0$ である場合は、Fig. 4.11(d) に示すように、 $|r_{\tau_0}| = |r_{-\tau_0}|$ であっても音像は頭内正中面より右に定位する。またFig. 4.15(b) に示すように、 r_{τ_0} が1/2より小さくなるにしたがって音像の定位は頭内正中面の右から左へ移動することが分かった。すなわち、相互相関関数の正のピークの位置が主として音像の左右方向感を規定すること、正のピークの値が小さくなるにしたがって負のピークの位置が音像の左右方向感を規定するようになることが明らかになった。

4.5.3 音像の上下方向感

音像の上下方向感は被験者によって傾向は異なるが、4名の被験者では、Fig. 4.11(b) に示すように相互相関関数のピークの値そのものが大きくなるにしたがって音像は上方に定位する傾向のあること、また、Fig. 4.12(b) および Fig. 4.13(b) に示すように、相互相関関数のピークの極性が正の場合は、音像の拡がり感が大きくなるにしたがって音像は下方に定位することが明らかになった。

4. 5. 4 音像の空間的印象に関する布置の相互関係

Fig. 3.1(a)とFig. 4.8 , Fig. 4.9 およびFig. 4.10とは各音像の布置は非常によく似ているので、これらの図の各軸の相互関係を検討する。これらの4つの図のI軸はいずれも音像の拡がり感と解釈できる。一方、Fig. 3.1(a)のII軸は左右方向感でなく、Fig. 4.8 , Fig. 4.9 およびFig. 4.10のII軸は左右方向感であること、Fig. 4.4 では記号1, 0および-1で示す音像がI-II軸平面上にあり、この平面はFig. 3.1(a)のI-II軸平面上と一致すること、Fig. 4.4 のIII軸が音像の左右方向感であることから、Fig. 4.8 , Fig. 4.9 およびFig. 4.10のII軸はFig. 3.1(a)のI-II軸平面に垂直な軸であると推定することができる。

4. 6 結言

相互相関関数の異なる2チャンネル音響信号をヘッドホン受聴した場合の音像の空間的印象を規定する心理的要因および物理的要因を調べ、以下のような結果を得た。

(1) 音像の空間的印象を規定する主要な心理的要因は音像の拡がり感、上下方向感および左右方向感である。

(2) 音像の拡がり感に対応する物理的要因は相互相関関数の絶対値の最大値およびそのピークの時間軸上での位置である。相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど、また、そのピークの位置が $\tau = 0$ より離れるほど音像の拡がり感が大きくなることを明らかにした。

(3) 音像の上下方向感に対応する物理的要因は相互相関関数のピークが正の範囲においては、ほぼピークの値そのものおよびその位置であることが明らかになった。相互相関関数のピークの値が小さくなるほど、また、その位置が $\tau = 0$ より離れるほど音像は下方に定位する傾向がある。したがって音像の上下方向感と音像の拡がり感は密接な関係がある。なお、音像の上下方向感には被験者による差異のあることが分かった。

(4) チャンネル間レベル差のない白色雑音対によって生じる音像の左右方向感に対応する物理的要因は相互相関関数の形の左右非対称性である。相互相関関数の正のピークの位置が主として音像の左右方向感を規定する。また、正のピークの値が小さくなるにしたがって負のピークの位置が音像の左右方向感を規定するようになることが明らかになった。

第5章 2チャンネル音響信号の相互相関関数と音像の拡がり感⁽⁷⁷⁾

5.1 概観

第4章で、相互相関関数の異なる白色雑音対をヘッドホン受聴した場合の音像の空間的印象は主として音像の拡がり感、上下方向感および左右方向感によって規定されることが、音響信号の相関係数が同じであってもその相互相関関数が異なる場合には音像の拡がり感などに差異のあることなどを示した。この中で特に音像の拡がり感はステレオ再生における最も主要な心理的効果の1つと考えられるので、次に、音像の拡がり感を定量的に表現することを試みる。本章では、まず、音像の拡がり感を相関係数の異なる白色雑音対の音像の拡がり感を基準として表す方法を提案する。次に、この手法を用いて相互相関関数の異なる種々の音響信号の音像の拡がり感を定量的に示す。

なお、相関係数の異なる白色雑音対の音像の拡がり感を基準に用いたので、本章では相関係数の異なる白色雑音対を基準白色雑音対と呼ぶことにする。

5.2 相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感

本節では、相互相関関数の形が最も単純な場合、すなわち、相互相関関数が単一のピークを持つ場合の白色雑音対の音像の拡がり感を定量的に示す。

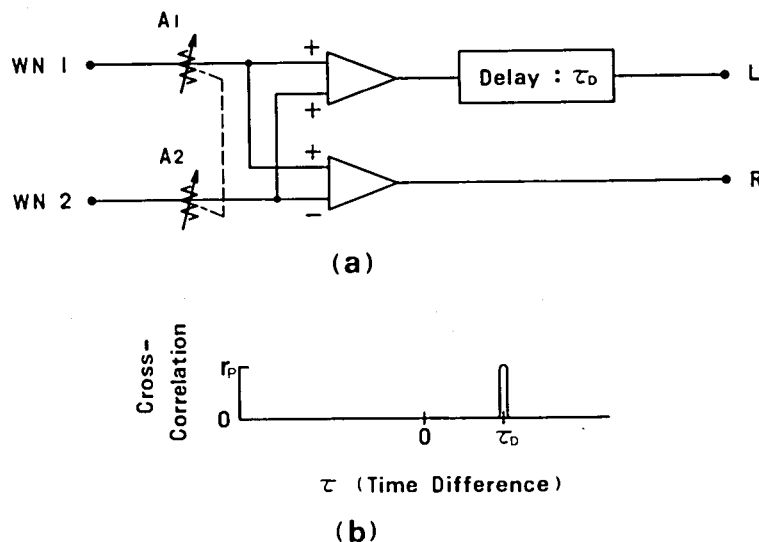


Fig. 5.1 Block diagram for synthesizing white noise of which the cross-correlation function has a single peak, and the shape of the cross-correlation function.

5. 2. 1 音響信号

相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対を Fig. 5.1(a)に示す方法で合成した。白色雑音対の相互相関関数は (2.1)式より

$$r(\tau) = r_p \cdot \delta(\tau - \tau_D) / \delta(0) \quad (5.1)$$

となる。ただし、 $r_p = (\overline{n_1} - \overline{n_2}) / (\overline{n_1} + \overline{n_2})$ である。ここに、 $\delta(\tau)$ はディラックの δ 関数、 $\overline{n_1}$ および $\overline{n_2}$ はそれぞれ白色雑音WN1 およびWN2 のレベルを音量減衰器A1およびA2により減衰させた後の2乗平均電圧、 τ_D は遅延回路の遅延時間である。音量減衰器A1およびA2の減衰量を変えることによって、相互相関関数のピークの大きさ r_p を1から-1まで変えることができる。相互相関関数の形を Fig. 5.1(b)に示す。実験には r_p を1, 0.75, 0.5, -0.5, -0.75および-1, τ_D を0から10msとした白色雑音対を用いた。なお、 $\tau_D = 0$ の場合は基準白色雑音対と一致する。

いずれの場合も白色雑音対の継続時間は1秒、立ち上がりおよび立ち下がり時間は50msである。また、白色雑音対のチャンネル間レベル差は0dBで、強さを約60dBSLで一定に保った。

5. 2. 2 実験方法および分析方法

相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対とは別に、基準白色雑音対を Fig. 2.1に示す方法で合成した。ただし、Fig. 2.1 のA1およびA2には逆連動型音量減衰器（一方の減衰量が増加すると他方の減衰量が減少するように組み合わせられた音量減衰器）を用いた。

実験はヘッドホン (DT 48)受聴により行い、相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対と基準白色雑音対を1秒間隔で交互に提示した。被験者は正常な両耳聴力を有する成人3名で、2種類の白色雑音対の音像の拡がり感が等しくなるように、基準白色雑音対の相関係数を1から0の範囲で調整した。相関係数の調整できる範囲を1から0とした理由は、音像の拡がり感が相関係数 r の絶対値によって規定され、 $r = 1$ で最小、 $r = 0$ で最大となることによる。なお、2種類の白色雑音対は被験者の調整が終わるまで繰り返し提示した。また、各条件に対していずれも2回の測定を行った。Fig. 5.1(a)に示す合成方法から推察できるように相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対の音像の定位は頭内正中面より右に偏ることがあるが、被験者はこの偏りを無視し、音像の拡がり感（幅）のみに着目して調整を行った。被験者は逆連動型音量減衰器A1お

よびA2を調整することにより，基準白色雑音対の相関係数を Table 5.1に示す値に設定することができる。

3名の被験者が各条件に対していずれも2回の調整を行ったので，条件ごとに $\overline{n_1^2}$ と $\overline{n_2^2}$ のレベル差に関する6ケの測定値が得られた。この6ケの測定値の平均値から音像の拡がり感が等しくなる場合の相関係数 r を求めた。

Table 5.1 Relationships between the level differences and the cross-correlation coefficients.

Level Difference $\overline{n_1^2} - \overline{n_2^2}$ (dB)	Cross-correlation coefficient : r
0	0.00
2	0.23
4	0.43
6	0.60
8	0.73
10	0.82
12	0.88
14	0.92
16	0.95
18	0.97
20	0.98
∞	1.00

5. 2. 3 実験結果

r_p が正の場合の結果を Fig. 5.2(a)に，負の場合の結果を Fig. 5.2(b)に示す。横軸は遅延回路の遅延時間 τ_0 ，すなわち相互相関関数のピークの位置，縦軸はその白色雑音対の音像と等しい拡がり感を持つ基準白色雑音対の相関係数 r である。すでに述べたように，基準白色雑音対の音像の拡がり感は $r = 1$ で最小， $r = 0$ で最大となるので，Fig. 5.2 の縦軸にこのことを示した。

Fig. 5.2 は，音像の拡がり感は τ_0 が大きくなるほど，また， r_p の極性にはほとんど依存せず r_p の絶対値が小さくなるほど一般的に大きくなることを示している。

また， τ_0 が約6～7ms以上では，いずれの場合においても r が0から 0.2の範囲の基準白色雑音対の音像の拡がり感と等しいことが分かる。第3章で述べたように $r = 0$ の基準白色雑音対の音像はほぼ両耳の間隔まで拡がっている。したがって，相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対の音像は，ピークの位置が $\tau = 0$ より約6～7ms以上離れていれば，ほぼ両耳の間隔まで拡がることになった。

なお， τ_0 が約6～7ms以上で音像が拡がるという現象は過渡的な音響信号を用いて調べた Schubert ら⁽⁷⁸⁾の結果とほぼ一致している。

ところで， $r_p = 0.75$ の場合には， τ_0 が約1～2msの範囲で音像の拡がり感は多少小

さくなる。この現象は音像の定位の偏りに関連があると思われる。被験者は、 τ_0 が0 msの場合の音像は頭内で左右対称に広がっているが、 τ_0 が約1～2 msでは音像の定位は右に偏り音像の広がっている範囲も頭内の右半分に限られて感じられることを指摘した。すなわち、音像の広がっている範囲が右半分に限られることにより拡がり感が多少小さく感じられたのではないかとと思われる。なお、 $r_p=0.5$ の場合には、音像の拡がり感が比較的大きく、定位の偏りが $r_p=0.75$ の場合ほど明確ではなかったのでこのような傾向が現れなかったと思われる。

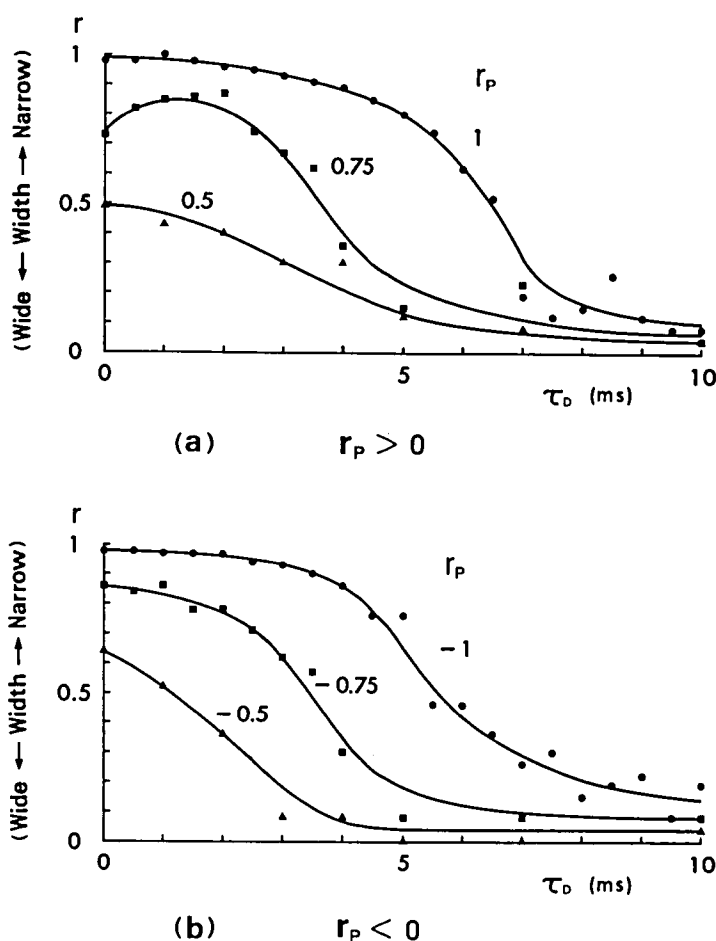


Fig. 5.2 The width of the sound image produced by the white noise of which the cross-correlation function has a single peak. The abscissa is the delay time τ_0 , which corresponds to the peak position of the cross-correlation function. The ordinate is the cross-correlation coefficient (r), which indicates the width of the sound image. The parameter is the peak value r_p of the cross-correlation function.

5. 2. 4 検討および考察

(A) 測定値の標準偏差と相関係数の弁別限

Fig. 5.2 に示す測定値の標準偏差は $r_p = 1$ の場合、 $\tau_0 = 0$ msで 0.004, $\tau_0 = 10$ msで 0.108 であった。

一方, Gabrielら⁽⁷⁹⁾は2肢強制選択法を用いて, 4.5 kHz 以下の低域雑音対の相関係数の弁別限を調べている。その結果, $r = 1$ および 0 の低域雑音対はそれぞれ $r = 0.97$ 以下および $r = 0.3$ 以上の低域雑音対と弁別できることを示した。このことは r が 1 に近づくほど弁別限が小さくなることを示唆している。

Fig. 5.2 の測定値の標準偏差と Gabrielらによる相関係数の弁別限とを単純に比較することはできないが, Fig. 5.2 の測定値の標準偏差は Gabrielらの弁別限より小さな値となっている。これは, 本実験では被験者が白色雑音対を繰り返し聴取し, 納得のいくまで調整を行うことができたことによるのではないと思われる。

(B) 2チャンネル音響信号の時間差と音像の左右方向感

一般に, 左右の耳に提示する音響信号に時間差のある場合には, 音像の定位は時間の進んだ音響信号を提示した耳の方向, すなわち, Fig. 5.1 の方法では右の耳の方向へ偏る。しかし, 被験者は, $r_p = 1$ の場合, τ_0 が 0 msから大きくなるにしたがって音像は右に偏りながら拡がっていくが, τ_0 が 4 ~ 5 ms以上になると定位の偏りは小さくなり, τ_0 が約 6 ~ 7 ms以上では, 定位の偏りは知覚されなくなることを指摘した。すなわち, スピーカ再生においては Haas⁽⁴⁾⁽¹⁹⁾が指摘するように約 30 msまでの時間差に対して音像は融合し定位の偏りが知覚されと考えられるが, ヘッドホンを用いて $r_p = 1$ の白色雑音対を聴取した場合には約 6 ~ 7 ms以下の時間差に対してのみ音像の定位の偏りが知覚されることが分かった。

なお, 被験者は遅延時間 τ_0 を約 15 ms以上にすると, 時間の進んだ音響信号がまず最初に聞こえ, 続いて時間の遅れた音響信号が聞こえるようになる, すなわち, 音響信号の立ち上がり部分の時間差が知覚できるようになるが, 定常部分の音像はほぼ左右対称に両耳の間隔まで拡がることを指摘した。

(C) 両耳相関モデルとの関係

Sayers ら⁽⁸⁰⁾および Cherry⁽⁸¹⁾は聴覚系の音像の両耳融合のメカニズムを時間特性を導入した音響信号の相互相関関数を用いて議論している。彼らは時間特性として、

$$W(t) = \begin{cases} e^{-t/k} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (5.2)$$

なる時間関数を用い、これを (2.1) 式に掛けて時間特性を導入した相互相関関数を求めた。ただし、 $k = 6 \text{ ms}$ とした。このモデルは、相互相関関数のピークの値が大きくなるほど音像が融合することを示すモデルである。しかし、時間関数として指数関数を仮定した根拠は明確ではない。

ところで、Fig. 5.2 は相互相関関数のピークの大きさが同じであっても、その位置が $\tau = 0$ より離れるにしたがって音像の拡がることを相関係数を指標として示している。また、Fig. 5.2 の関数は指数関数の形では変化をしていない。

したがって、音像の融合を示すモデルにおいて、時間関数として指数関数を用いるのではなく、相互相関関数のピークの大きさによって形は異なるが Fig. 5.2 に示す時間関数を掛けた方が、より聴覚系に適合した相互相関関数が得られると思われる。

また、左右の音響信号に大きな相関があれば音像は融合し拡がり感小さくなるが、音像が融合するためには音響信号の大きな相関はある限られた時間内、すなわち、聴覚系が両耳における音響信号の微細な特徴を保持し左右の音響信号の比較が可能な時間内にある必要があると考えられる。ところで、Fig. 5.2 は $r_p = 1$ の場合 τ_0 が大きくなるにしたがって 6 ms から 7 ms の範囲で音像の拡がり感が急に大きくなることを示している。したがって、聴覚系は白色雑音の微細な特徴を約 $6 \sim 7 \text{ ms}$ の間だけ保持し比較できることが推定される。

5.3 相互相関関数が2つのピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感

一般に、2チャンネル音響信号の相互相関関数は多数のピークを持つ。このような音響信号の音像の拡がり感を定量的に推定することを目的として、次に、相互相関関数が2つのピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感を定量的に明らかにする。

5.3.1 音響信号

相互相関関数が2つのピークを持つ白色雑音対を Fig. 5.3 に示す方法で合成した。ただし、 $\tau_0 = 0$ の場合には相互相関関数のピークの数は一つまたは0となる。白色雑音対の相互相関関数は、白色雑音 WN1 および WN2 の2乗平均出力電圧が等しい場合、(2.1)式より

$$r(\tau) = \frac{\pm \delta(\tau + \tau_D) \pm \delta(\tau - \tau_D)}{2 \cdot \delta(0)} \quad (5.3)$$

となる。ただし、第1項および第2項の複号はそれぞれクロストローク成分を右および左の音響信号へ付加するときの極性に対応する。

Fig. 5.4(a),(b)および(c)に相互相関関数の形を示す。ただし、Fig. 5.4(a),(b)および(c)はそれぞれ相互相関関数のピークが正のみの場合、正と負の場合および負のみの場合で

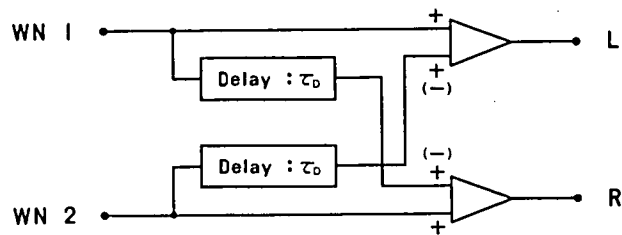
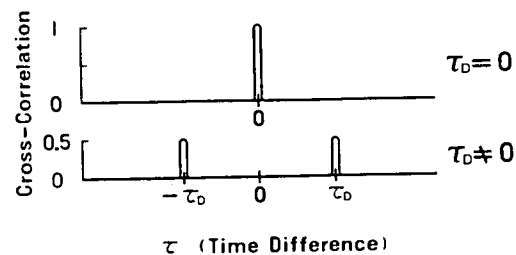
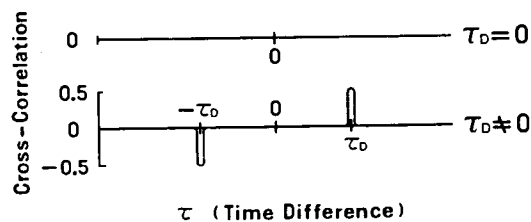


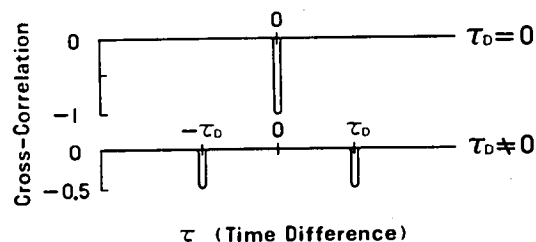
Fig. 5.3 Block diagram for synthesizing white noise of which the cross-correlation function has two peaks.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.4 The cross-correlation functions with (a) both positive, (b) positive and negative, and (c) both negative two peaks.

ある。

実験には遅延時間 τ_0 を0から5msとした白色雑音対を用いた。いずれの場合も白色雑音対の継続時間は1秒、立ち上がりおよび立ち下り時間は50msである。また、白色雑音対のチャンネル間レベル差は0dBで、強さを約60dBSLで一定に保った。

5.3.2 実験方法および分析方法

実験方法および分析方法は5.2節に述べた方法とまったく同じである。ただし、被験者は正常な両耳聴力を有する成人4名である。

5.3.3 実験結果

Fig. 5.5(a), (b) および(c) にそれぞれ相互相関関数が正のみのピークを持つ場合、

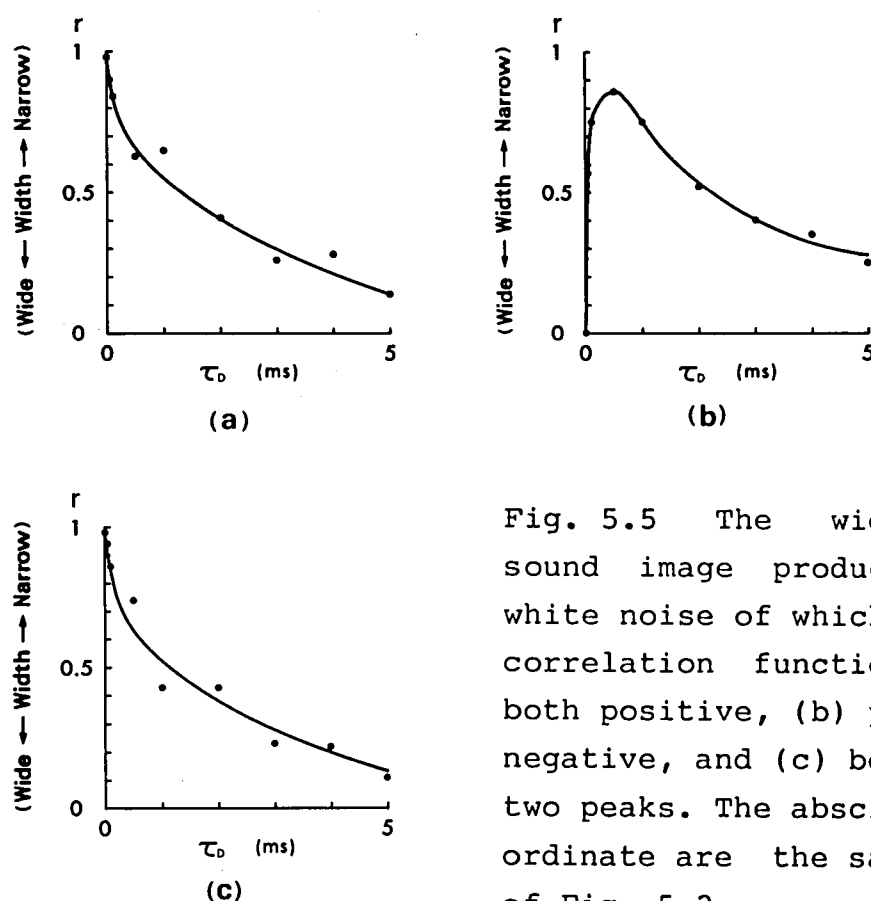


Fig. 5.5 The width of the sound image produced by the white noise of which the cross-correlation function has (a) both positive, (b) positive and negative, and (c) both negative two peaks. The abscissa and the ordinate are the same as those of Fig. 5.2.

正と負のピークを持つ場合および負のみのピークを持つ場合を示す。横軸は遅延回路の遅延時間 τ_0 、縦軸はその白色雑音対の音像と等しい拡がり感を持つ基準白色雑音対の相関係数 r である。

Fig. 5.5 は相互相関関数が正のみまたは負のみのピークを持つ場合は、 τ_0 が大きくなるほど音像の拡がり感が大きくなること、 τ_0 が小さくなるほど音像の拡がり感を示す相関係数 r は大きく変化することを示している。また、これら2つの場合の音像の拡がり感はピークの極性にはほとんど依存せず τ_0 の値が等しければほぼ等しいことが分かる。一方、相互相関関数が正と負のピークを持つ場合は、音像の拡がり感は $\tau_0 = 0$ msで最大、 $\tau_0 \approx 500 \mu\text{s}$ で最小となること、 τ_0 が約 $500 \mu\text{s}$ 以上では、 τ_0 が大きくなるほど音像の拡がり感は大きくなることが分かる。なお、この場合の相互相関関数の形は左右非対称で、 $\tau > 0$ の範囲に正のピークを持つので、音像の拡がり感の小さい範囲では音像の定位は右に偏っている。

5.3.4 検討

第4章で、 $\tau_0 = 200 \mu\text{s}$ では、音像の拡がり感は相互相関関数の2つのピークの極性の組み合わせにはほとんど依存しないことを示した。このことはFig. 5.5 によって裏付けられている。すなわち、Fig. 5.5 は相互相関関数が正のみのピークを持つ場合、正と負のピークを持つ場合および負のみのピークを持つ場合の $\tau_0 = 200 \mu\text{s}$ のときの音像の拡がり感はそれぞれ相関係数0.77、0.80および0.76の基準白色雑音対の拡がり感と等しいことを示している。このように基準白色雑音対の相関係数が互いにほぼ等しいということは、 $\tau_0 = 200 \mu\text{s}$ の場合には相互相関関数のピークの極性に音像の拡がり感はほとんど依存しないということである。

さらに、第4章で、相互相関関数が2つの大きさの等しい正のピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感は、 τ_0 が $600 \mu\text{s}$ から $1200 \mu\text{s}$ の範囲ではほぼ等しいことを示した。一方、Fig. 5.5(a)は τ_0 が $600 \mu\text{s}$ から $1200 \mu\text{s}$ まで変化する間に、その音像と等しい拡がり感を持つ基準白色雑音対の相関係数は0.63から0.52まで変化することを示している。このことは相関係数が0.63の場合と0.52の場合の音像の拡がり感の差異は非常に小さいが、それらの白色雑音対を納得のいくまで何回も聞いて比較した場合にはそのわずかな差異が知覚できることに対応している。

5.4 くし型の振幅－周波数特性を持つ雑音対の音像の拡がり感

第4章で述べたように、2チャンネル音響信号を被験者の前方 $\pm 30^\circ$ 方向に置いた2つのスピーカで再生した場合、左右のスピーカからそれぞれ右および左の耳へ約 $250\mu\text{s}$ 遅れた遅延信号がクロストークとして生じる。したがって、スピーカ入力における左右の音響信号がまったく等しい場合においても、聴取者の外耳道入り口における音響信号の振幅－周波数特性はくし型となる。本節ではこのような場合を想定して、くし型の振幅－周波数特性を持つ雑音対の音像の拡がり感を定量的に示す。

5.4.1 音響信号

くし型の振幅－周波数特性を持つ雑音対を Fig. 5.6 に示す方法で合成した。なお、Fig. 5.6 では、原信号および遅延信号を付加するときの極性を様々に変えて、実際のスピーカ再生では起こり得ないような組み合わせも考慮した。

左右の雑音を合成するときの原信号をそれぞれ L_0 および R_0 、遅延信号をそれぞれ L_{τ_0} および R_{τ_0} とする。Fig. 5.6 に示すように L_0 と R_0 、 L_{τ_0} と R_{τ_0} はまったく等しいが、ここでは議論を明確にするために区別して表す。原信号および遅延信号を付加するときの極性の組み合わせは Table 5.2 に示すように8通りあるが、 $\tau_0 \neq 0\text{ ms}$ の場合の相互相関関数の形としては6通りになる。 $\tau_0 = 0\text{ ms}$ の場合に、左または右の音響信号のレベルが 3 dB 大きくなる場合または $-\infty\text{ dB}$ となる場合があるので、それらを 3 または $-\infty$ で示した。なお、左または右の音響信号のレベルが $-\infty\text{ dB}$ となる場合には相互相関関数は定義できない。

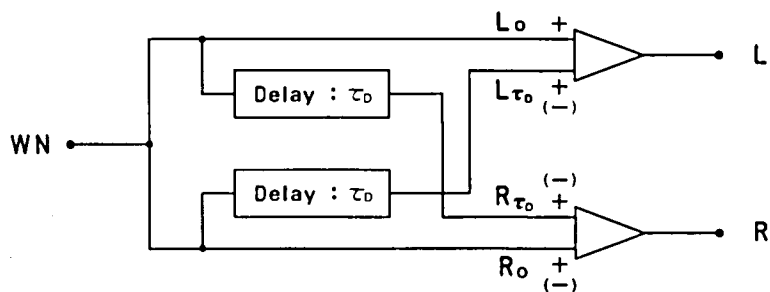



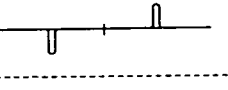
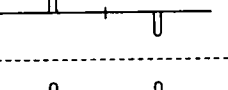
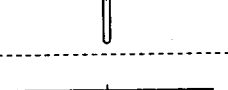
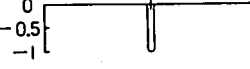



Fig. 5.6 Block diagram for synthesizing noises with the comb-filter-type amplitude frequency characteristic.

Table 5.2 The various cross-correlation functions of the noises with the comb-filter-type amplitude frequency characteristic.

$L_0 L_{\tau_0}, R_0 R_{\tau_0}$	$\tau_0 = 0$	$\tau_0 \neq 0$
++ ++	 $L=R=3 \text{ (dB)}$	
+- +-	$L=R=-\infty$	
++ +- +- --	$L=3, R=-\infty$ $L=-\infty, R=3$	
++ -+ +- ++	$L=3, R=-\infty$ $L=-\infty, R=3$	
+- -+	$L=R=-\infty$	
++ --	 $L=R=3$	

ここで、くし型の振幅一周波数特性を持つ雑音，すなわち， $\tau_0 \neq 0 \text{ ms}$ として合成した雑音の自己相関関数について述べる。

$\tau_0 \neq 0 \text{ ms}$ の場合の雑音の自己相関関数は，原信号および遅延信号を付加するときの極性の組み合わせに依存する。極性が等しい場合の自己相関関数は， $\tau_0 \neq 0 \text{ ms}$ として L_0 ，

L_{τ_0} ， R_0 および R_{τ_0} をいずれも正で合成したときの相互相関関数の形に等しく，極性が互いに異なる場合の自己相関関数は， $\tau_0 \neq 0 \text{ ms}$ として L_0 ， L_{τ_0} ， R_0 および R_{τ_0} を正，負，正，負で合成したときの相互相関関数の形に等しくなる。このことは音響信号の自己相関関数は左右の音響信号がまったく等しい場合の相互相関関数と同一であることから簡単に分かる。

一方， $\tau_0 = 0 \text{ ms}$ でレベルが3 dB大きくなる雑音は白色雑音なのでその自己相関関数は $\delta(\tau)$ である。

実験には， τ_0 を0から10msとした雑音対を用いた。雑音対の継続時間は1秒，立ち上がりおよび立ち下がり時間は50msである。また，雑音対の強さは約60dBSLで一定に保った。

5.4.2 実験方法および分析方法

実験方法および分析方法は 5.2 節に述べた方法とまったく同じである。被験者は正常な両耳聴力を有する成人 4 名である。なお、 $\tau_0 = 0$ ms で、左または右の音響信号のレベルが $-\infty$ dB となる場合には、音響信号は右または左の耳の付近に定位するが、実験ではこのような定位の偏りは無視して、音像の拡がり感（幅）のみに着目して調整を行った。

5.4.3 実験結果

$\tau_0 \neq 0$ ms のとき、 $\tau = 0$ で相互相関関数が 1 または -1 となる場合が 4 通りある。この場合の音像の拡がり感は τ_0 の値にかかわらず常に小さく、ほぼ $r = 1$ の基準白色雑音対の音像の拡がり感と等しいことが分かった。

一方、 $\tau_0 \neq 0$ ms のとき、 $\tau = 0$ で相互相関関数が 0 となる場合は 2 通り（原信号および遅延信号を付加するときの極性の組み合わせでは 4 通り）ある。この場合の結果を Fig. 5.7 に示す。横軸および縦軸は Fig. 5.2 と同一である。Fig. 5.7 から、 $\tau = 0$ で相互相関関数が 0 となる場合、すなわち、ピークが $\pm 1/2$ である場合は、 τ_0 が大きくなるほど音像の拡がることが明らかになった。

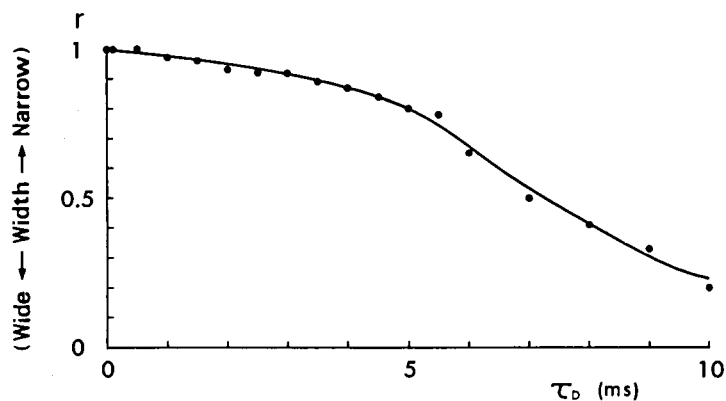


Fig. 5.7 The width of the sound image produced by the noise with the comb-filter-type amplitude frequency characteristic. The value of the cross-correlation function of the noise is equal to 0 at $\tau=0$. The abscissa and the ordinate are the same as those of Fig. 5.2.

5. 4. 4 検討

くし型の振幅－周波数特性を持つ雑音対において、 $\tau = 0$ で相互相関関数が0となる場合、 τ_0 が大きくなるほど音像の拡がり感は大きくなる。ところで、この場合の音響信号の合成方法は、良く知られた擬似ステレオ方式の一方式とまったく同じである⁽⁹¹⁾。したがって、Fig. 5.7 は、この擬似ステレオ方式における遅延時間と音像の拡がり感との対応関係を示していることになる。Fig. 5.7 から遅延時間が約10ms程度であればほぼ十分な拡がり感の得られることが分かる。したがって、擬似ステレオ方式における遅延時間を約10ms以上に設定する必要があることが推察される。この値は、これまでよく用いられていた遅延時間2～4msより大きい⁽⁹¹⁾、これは、定常的な雑音対をヘッドホン受聴して音像の拡がり感を調べたためであると考えられる。したがって、一般の音響信号をスピーカ再生する場合は、別途検討を要すると思われる。

ところで、 $\tau = 0$ で相互相関関数が0となる場合の相互相関関数の形は、Fig. 5.4 (b) と $\tau_0 \neq 0$ msでは一致している。しかし、その音像の拡がり感はFig. 5.5(b)に示すようにFig. 5.7 とは大きく異なっている。したがって、音像の拡がり感は左右の音響信号の相互相関関数のみで決まるのではなく、左右の音響信号の自己相関関数にも依存することが明らかになった。

5. 5 結言

相互相関関数 $r(\tau)$ の異なる種々の音響信号の音像の拡がり感を基準白色雑音対すなわち相関係数の異なる白色雑音対の音像の拡がり感を基準として心理実験により定量的に示した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 相互相関関数が単一のピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感はピークの位置が $\tau = 0$ より離れるほど、また、ピークの極性にはほとんど依存せずピークの絶対値が小さくなるほど大きくなる傾向がある。

(2) 相互相関関数が2つのピークを持つ白色雑音対の音像の拡がり感を定量的に示した。2つのピークの絶対値および極性がまったく等しい場合の白色雑音対の音像の拡がり感は、ピークの位置が $\tau = 0$ より離れるほど大きくなる。また、2つのピークの絶対値は等しいが極性が異なる場合の白色雑音対の音像の拡がり感は、ピークの位置が $\tau \approx 500\mu\text{s}$ にある場合に最小となる。

(3) くし型の振幅－周波数特性を持つ雑音対の音像の拡がり感を定量的に示した。

その結果、相互相関関数のピークが1または-1である場合は常に $r = 1$ の基準白色雑音対の音像の拡がり感とほぼ等しいこと、また、そのピークが $\pm 1/2$ である場合はピークの位置が $\tau = 0$ より離れるほど大きくなることが分かった。

(4) 相互相関関数がまったく同じ2チャンネル音響信号であっても、それらを構成する音響信号の自己相関関数が異なる場合には音像の拡がり感に差異のあることが分かった。

(5) 聴覚系は白色雑音の微細な特徴を約6～7msの間だけ保持し比較できることを推定した。したがって、2チャンネル音響信号の相互相関関数を変化させる手法により音像の拡がり感を制御するには、約6～7ms以内の音響信号の相関を変えればほぼ十分であると考えることができる。ただし、遅延回路を用いてくし型フィルタを構成する擬似ステレオ方式においては遅延時間を約10ms程度にした方が効果的であることを推察した。

第6章 2チャンネル音響信号の相関係数とスピーカ再生における 音像の空間的印象⁽⁷¹⁾⁽⁸²⁾

6.1 概観

一般に、音像はヘッドホン再生では頭内に定位をするがスピーカ再生では頭外に定位をする。すなわち、ヘッドホン再生とスピーカ再生では音像の空間的印象に大きな差異がある。そこで、本章で改めてスピーカ再生における音像の空間的印象について述べる。

すでに述べたように、2チャンネルスピーカ再生における音像の水平面内の方向定位についてはこれまでにほぼ解明されているので、本章では音像の水平面内の方向定位以外の空間的印象について明らかにする。

Damaskeら⁽⁶⁰⁾⁽⁶⁵⁾は複数のスピーカから広帯域雑音を提示した場合の音像の拡がり感が、スピーカ配置および雑音間の相関係数に依存すること、左右の外耳道入り口における音響信号の相関係数（以後、両耳間相関係数と呼ぶ）を小さくすれば音像の拡がり感は大きくなることを示した。Plenge⁽⁵⁵⁾は無響室において2つのスピーカから相関係数の異なる低域雑音対を提示した場合の音像は定位および大きさなどが異なることをイラストで定性的に示した。また、柳川ら⁽⁶⁶⁾もスピーカ再生の場合に帯域雑音対の両耳間相関係数と音像の拡がり感がよく対応することを示している。一方、室内音響の分野では、反射音によるホールの響きの印象を両耳間相関係数に対応させて調べている。Barron⁽⁶⁴⁾は初期反射音を付加した場合には両耳間相関係数と音像の拡がり感がよく対応することを示した。また、安藤ら⁽⁶⁷⁾⁽⁶⁸⁾⁽⁶⁹⁾は単一または複数の反射音が存在する場合の音像は両耳間相関係数の絶対値が小さいほど拡がり感が増し、好まれることを示している。

このようにスピーカ再生においても音響信号の相関係数あるいは両耳間相関係数が音像の拡がり感によく対応することを指摘する研究は比較的多いが、相関係数の変化が音像の拡がり感のほかにもどのような効果を与えているのかは明らかにされていない。そこで、相関係数の異なる白色雑音対を2つのスピーカで再生して音像の空間的印象を規定する物理的要因および心理的要因を明らかにする。

6.2 音像の空間的印象に関する類似性実験と分析

6.2.1 実験方法および分析方法

実験には第3章で用いた相関係数の異なる7種類の白色雑音対，低域雑音対（1 kHz以下），中域雑音対（1～3 kHz）および高域雑音対（3 kHz以上）を用いた。各雑音対の物理的条件（継続時間，提示条件など）は第3章とまったく同じである。

実験は無響室で行った。Fig. 6.1 に示すように2つのスピーカを被験者前方 $\pm 30^\circ$ ，ほぼ耳の高さで距離2 mの位置に置いた。スピーカと被験者の間には音響的に透明なカーテンを張り視覚の影響を除いた。被験者は正常な両耳聴力を有する成人4名で，実験のはじめに $r = 1$ の雑音対を聞き，その音像が正中面内に定位するように着座し，そのままの姿勢を保ったまま相関係数の異なる7種類の雑音対のすべての組み合わせ（42通り）について一対比較による音像の空間的印象の類似性判断（Table 3.1に示す5段階

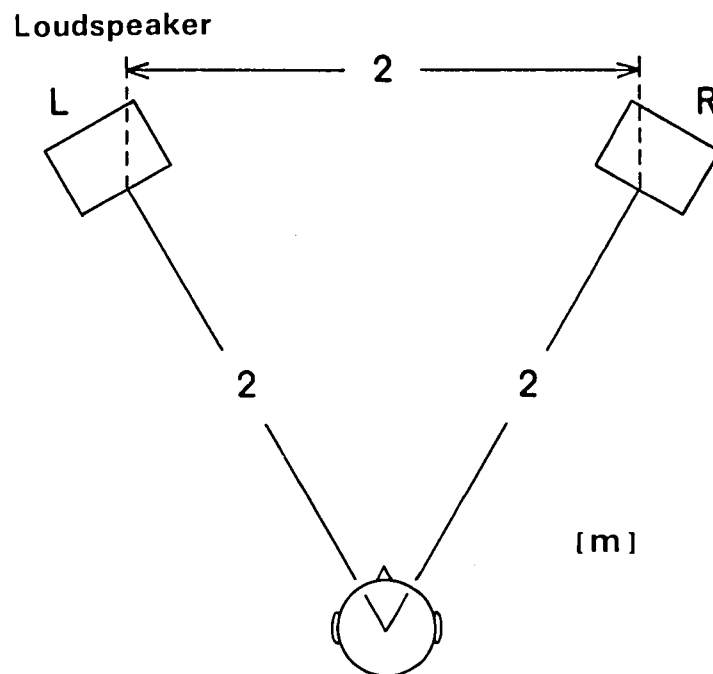


Fig. 6.1 Arrangement of loudspeakers. The height of each loudspeaker was approximately equal to that of the subject's ears. In order to avoid the influence of visual cues, the loudspeakers were screened from the view of the subject by an acoustically transparent curtain.

評価)を行った。

4名の被験者による判断はほぼ同じ傾向を示していたので、4名の判断の合計値から音像の空間的印象に関する類似性マトリックスを作成し、KruskalのMDSで分析した。

6.2.2 実験結果

結果をFig. 6.2に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で2次元知覚空間上に布置でき、音像の空間的印象が何等かの2つのほぼ独立した心理的要因に依存していることが分かる。また、音像の空間的印象を規定する2つの物理的要因はI軸およびII軸に対応してそれぞれ相関係数の絶対値および相関係数そのものであると解釈することができる。このように、スピーカ再生時における結果とヘッドホン受聴時における結果とは非常によく似ていることが分かった。

6.3 音像の空間的印象を規定する心理的要因

本節ではFig. 6.2のI軸およびII軸に対応する心理的要因の意味を明らかにする。

6.3.1 実験方法および分析方法

実験は類似性判断の実験とまったく同じスピーカ配置で行った。予備実験において被験者は音像の空間的印象の差として音像の拡がり感、距離感および上下方向感を指摘したので、相関係数の異なる7種類の白色雑音対のすべての組み合わせについて一対比較により、どちらの音像がより

- | | |
|---------------|---------|
| (A) 拡がっているか | (拡がり感) |
| (B) 遠方に知覚されるか | (距離感) |
| (C) 上方に知覚されるか | (上下方向感) |

の判断をそれぞれ行った。

なお、音像の距離感の差異が他の判断に及ぼす影響を除くために、拡がり感の判断では音像の見込み角ではなく音像の幅による判断を行うこと、上下方向感の判断では音像の仰角ではなく音像の生じた位置の高低による判断を行うことを指示した。また、距離感の判断ではあらかじめすべての音像は後頭部付近より前方に定位することを確認した。

分析方法は3.3節とまったく同様である。

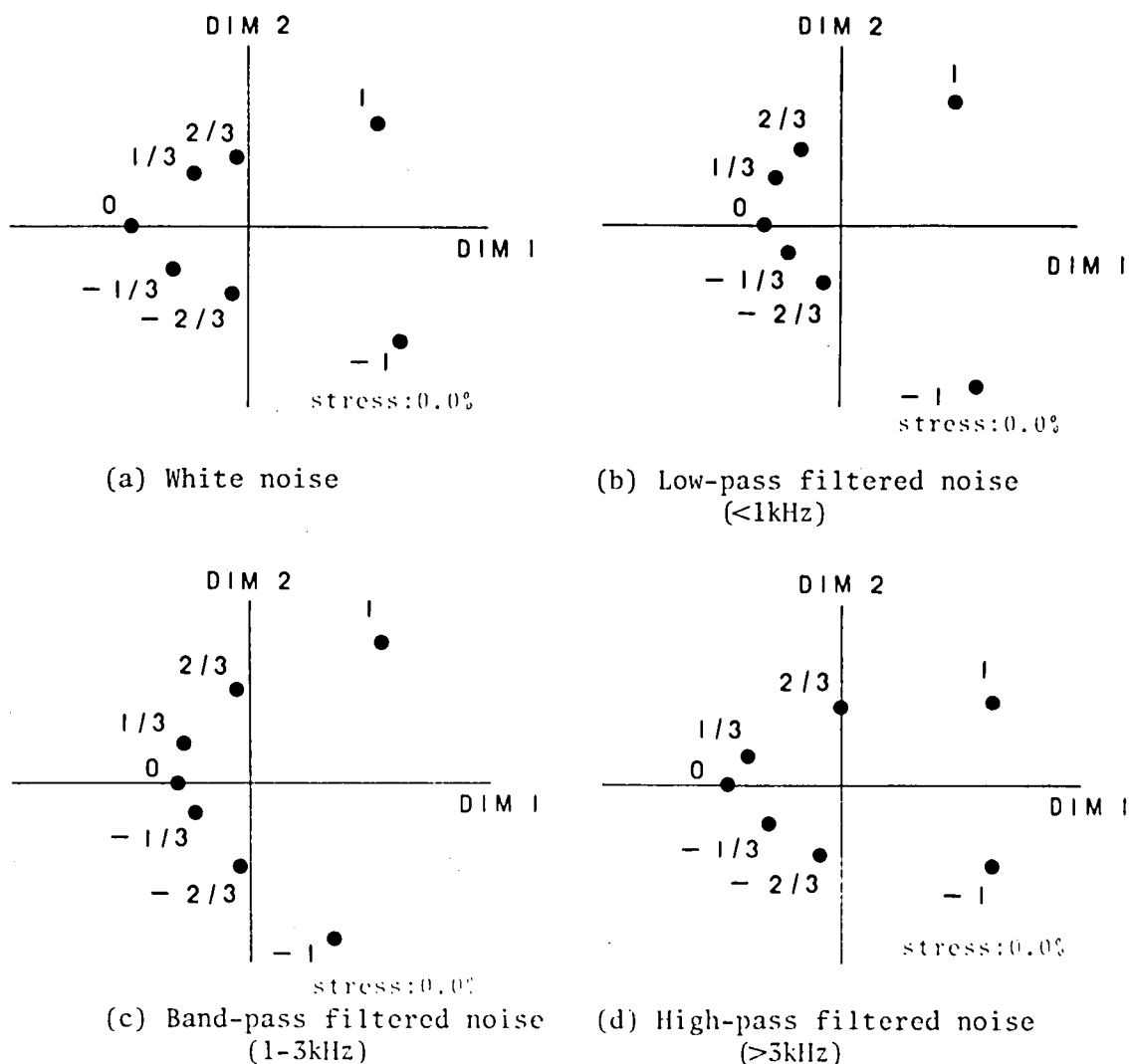


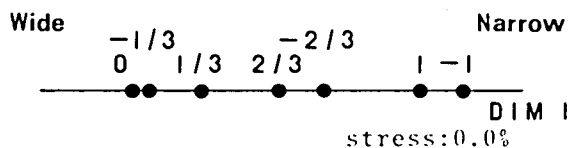
Fig. 6.2 Two-dimensional configurations of (a)white noises, (b)low-pass-filtered noises (<1 kHz), (c) band-pass-filtered noises(1-3 kHz), (d)high-pass-filtered noises(>3 kHz) with the various cross-correlation coefficients. These configurations show that the spatial impressions of the sound image depend on approximately two independent psychological factors in the anechoic chamber.

6.3.2 実験結果

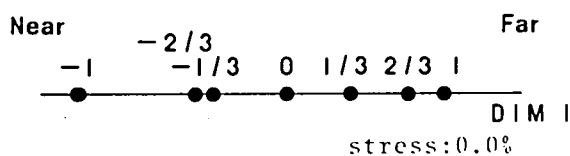
(A) 拡がり感

4名の被験者による拡がり感に関する判断はほぼ同じ傾向を示していたので、4名の判断の合計値を用いて分析した。結果をFig. 6.3(a)に示す。各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置でき、音像の拡がり感は各被験者に共通な1つの心理的な軸となっていることが分かる。

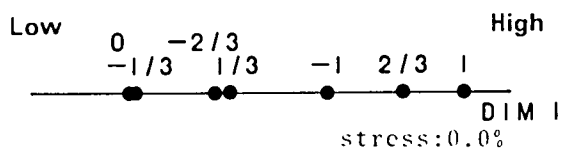
なお、音像をより拡がっていると判断した割合は、 $r = 0$ の場合に87.5%， $r = 1$ および -1 の場合にそれぞれ11.5%および5.2%であり、ヘッドホン受聴時における結果と同様に白色雑音対の相関係数の絶対値が小さくなるほど音像はより拡がって知覚されることが明らかになった。



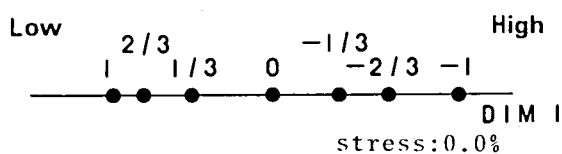
(a) Width



(b) Distance



(c) Elevation (Sub.1)



(d) Elevation (Sub.2)

Fig. 6.3 One-dimensional configurations of white noises concerning (a) width, (b) distance, (c) and (d) elevation of the sound image in the anechoic chamber, respectively.

(B) 距離感

4名の被験者による距離感に関する判断はほぼ同じ傾向を示していたので、4名の判断の合計値を用いて分析を行った。結果をFig. 6.3(b)に示す。各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置でき、音像の距離感も各被験者に共通な1つの心理的な軸となっていることが分かる。

なお、音像をより遠方に知覚した割合は $r = 1$ の場合に92%、 $r = -1$ の場合に0%であり、白色雑音対の相関係数が大きいほどより遠方に知覚されることが分かった。

(C) 上下方向感

4名の被験者による上下方向感に関する判断は異なった傾向を示していたので、被験者ごとの判断値を用いて分析を行った。対照的な2名の被験者(Sub.1およびSub.2)の結果をFig. 6.3(c)および(d)に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置でき、音像の上下方向感は被験者によって傾向は異なるが、個々の被験者についてはそれぞれ1つの心理的な軸となっていることが明らかとなった。

なお、音像をより上方に知覚した場合はSub.1では $r = 1$ の場合に97%、 $r = 0$ の場合に11%であり、Sub.2では $r = -1$ の場合に97%、 $r = 1$ の場合に6%であった。他の2名の被験者はSub.1に近い傾向を示した。したがって3名の被験者は $r = 1$ の音像を比較的上方に知覚しており、正中面内の音像定位の研究で指摘されている現象⁽¹¹⁾と一致した。しかし、Sub.2のように $r = 1$ の音像を必ずしも上方に知覚しない被験者もあり、上下方向感は被験者によって判断の異なることが明らかとなった。

6.4 検討

6.4.1 音像の空間的印象を規定する物理的要因と心理的要因の対応関係

Fig. 6.2のI軸およびII軸に対応する物理的要因はそれぞれ相関係数の絶対値および相関係数そのものである。これらの物理的要因と心理的要因との対応関係を定量的に示すために、Fig. 6.2(a)のI軸およびII軸とFig. 6.3に示した各軸との相関係数を求めた。結果をTable 6.1に示す。Table 6.1はFig. 6.2(a)のI軸と音像の拡がり感、II軸と音像の距離感が非常によく対応していることを示している。また、Sub.2では音

Table 6.1 Correlation coefficients for six psychological scale values in the anechoic chamber. Dimensions I and II of Fig. 6.2(a) correspond very closely to the width and distance of the sound image, respectively.

	1	2	3	4	5	6
1:Dimension I of Fig.6.2(a)	1.00	-0.07	0.97	-0.11	0.78	0.08
2:Dimension II of Fig.6.2(a)		1.00	-0.13	0.99	0.49	-1.00
3:Width			1.00	-0.15	0.76	0.14
4:Distance				1.00	0.47	-0.99
5:Elevation(Sub.1)					1.00	-0.49
6:Elevation(Sub.2)						1.00

像の上下方向感も Fig. 6.2(a)のⅡ軸によく対応していることが分かる。これらのことから以下の知見が得られる。第1に、ヘッドホン受聴時と同様に雑音対の相関係数の絶対値と音像の拡がり感（音像の幅）が非常によく対応し、相関係数の絶対値が小さくなるほどより拡がった音像として知覚される。第2に、雑音対の相関係数と音像の距離感是非常によく対応し、相関係数が -1 に近づくほど音像はより近くに知覚される。

Hanson ら⁽⁴⁸⁾, Leakey⁽⁵⁰⁾および Gardnerら⁽⁶²⁾は逆位相の信号音（ $r = -1$ ）を無響室で提示した場合には音像は頭内または後頭部付近に定位することを指摘しており、ここで得られた結果は矛盾してはいない。なお、音の大きさなども距離感に影響を及ぼすことが指摘されているが⁽⁵⁷⁾、本実験では音の大きさは一定であり、音の大きさが一定であれば相関係数によって音像の距離感が変化すると考えることができる。第3に、音像の上下方向感是被験者によっては大きな差があり、被験者に共通する1つの軸を Fig. 6.2(a)の中に見い出すことはできなかった。しかし、3名の被験者はほぼ共通して $r = 1$ の音像を上方に知覚しており、音響信号の相関係数によってある程度は上下方向感の制御が可能であると思われる。

6.4.2 音像の空間的印象に及ぼす周波数帯の効果

ヘッドホン受聴時における結果と同様にⅠ軸方向の差は各周波数帯でほとんど変化していないが、Ⅱ軸方向の差は高い周波数帯に対しては小さくなる傾向がある。したがっ

て、音像の拡がり感の変化は高い周波数帯においても知覚されるが、距離感の高い周波数帯では知覚しにくくなることが分かった。

6. 4. 3 音響信号の相関係数と両耳間相関係数

Fig. 3.1 と Fig. 6.2 は非常によく一致しているので、スピーカ入力における音響信号の相関係数と被験者の外耳道入り口における両耳間相関係数とがよく似ているのではないかと推定される。そこで、被験者の聴取位置にダミーヘッドマイクロホンを置き、外耳道入り口における白色雑音対の相互相関関数を測定した。結果を Fig. 6.4 に示す。 $\tau = \pm 250 \mu\text{s}$ の位置におけるピークは左右のスピーカからそれぞれ右および左の耳へ音

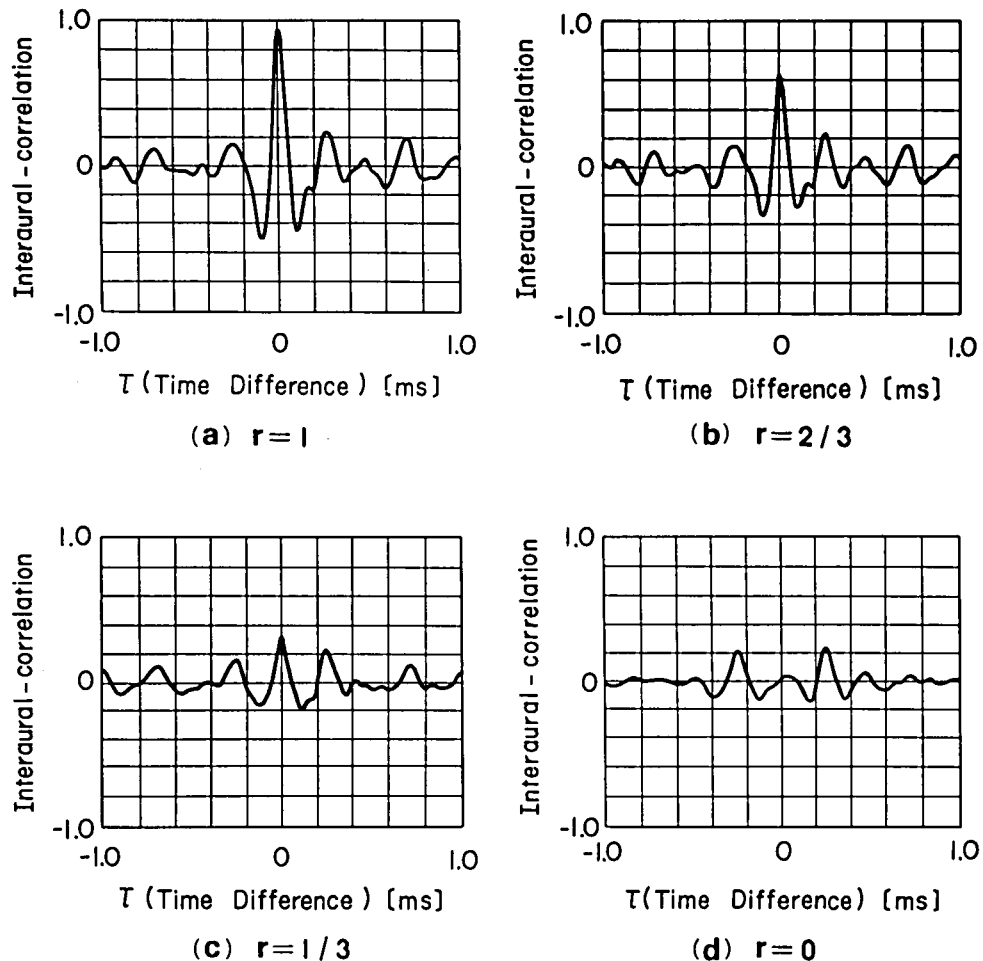
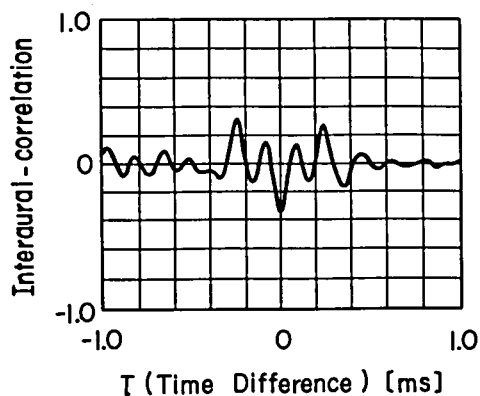
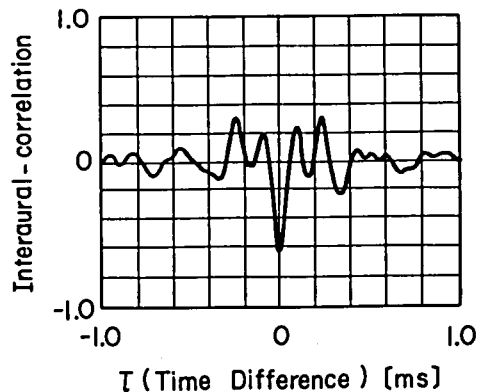


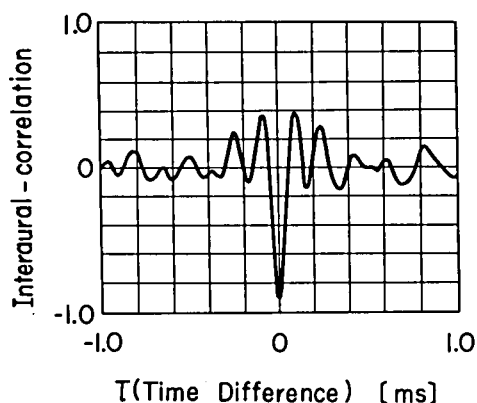
Fig. 6.4 (a to d) The interaural correlation functions corresponding to $r=1, 2/3, 1/3, 0, -1/3, -2/3$, and -1 . The peak value near $\tau = \pm 250 \mu\text{s}$ is caused by the crosstalk from each loudspeaker to both ears.



(e) $r = -1/3$



(f) $r = -2/3$



(g) $r = -1$

Fig. 6.4 (e to g) The interaural correlation functions corresponding to $r=1, 2/3, 1/3, 0, -1/3, -2/3$ and -1 . The peak value near $\tau=\pm 250 \mu s$ is caused by the crosstalk from each loudspeaker to both ears.

響信号がクロストークしたために生じたものである。 $r = 1, 2/3, 1/3, 0, -1/3, -2/3$ および -1 の白色雑音対を提示した場合の両耳間相関係数はそれぞれ $0.93, 0.61, 0.29, 0.02, -0.34, -0.62$ および -0.88 であり、音響信号の相関係数が外耳道入り口においてもほぼ保たれていることが明らかになった。

6. 4. 4 音像の空間的印象に及ぼす残響の効果

無響室における音像の空間的印象は主として音像の拡がり感と距離感によって規定さ

れることを明らかにしたが、このような結果が一般に残響のある部屋でも成り立つかどうかを調べるために、試験室および会議室（残響時間はそれぞれ 500Hzで0.17および0.77秒）で実験を行った。実験方法および分析方法は無響室の場合とまったく同様である。

試験室では帯域雑音対を用いず、すべて白色雑音対を用いて実験を行った。被験者は4名である。音像の空間的印象の類似性判断、音像の拡がり感および距離感の判断では4名の被験者がほぼ同じ傾向を示したので4名の判断の合計値を用いて分析

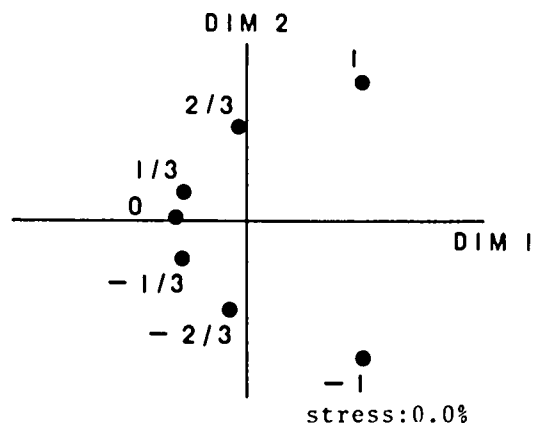
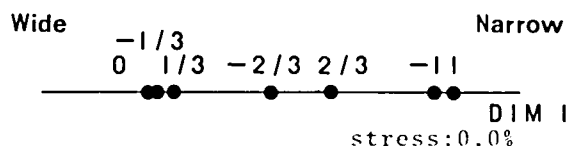
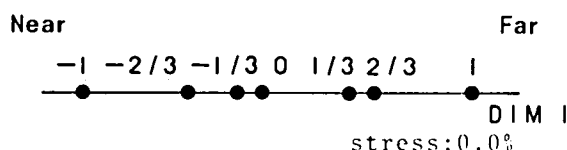


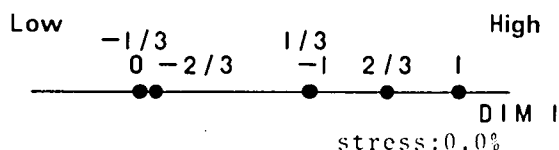
Fig. 6.5 Two-dimensional configuration of white noise. This configuration shows that the spatial impressions of the sound image depend on approximately two independent psychological factors in the listening room.



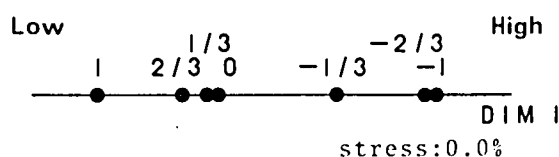
(a) Width



(b) Distance



(c) Elevation (Sub.1)



(d) Elevation (Sub.2)

Fig. 6.6 One-dimensional configurations of white noises concerning (a) width, (b) distance, (c) and (d) elevation of the sound image in the listening room, respectively.

Table 6.2 Correlation coefficients for six psychological scale value in the listening room. Dimensions I and II of Fig. 6.5 correspond very closely to the width and distance of the sound image, respectively.

	1	2	3	4	5	6
1:Dimension I of Fig.6.5	1.00	0.03	0.97	0.00	0.67	0.01
2:Dimension II of Fig.6.5		1.00	0.13	0.98	0.63	-0.97
3:Width			1.00	0.09	0.75	-0.05
4:Distance				1.00	0.61	-0.95
5:Elevation(Sub.1)					1.00	-0.58
6:Elevation(Sub.2)						1.00

し、上下方向感の判断では被験者によって異なる傾向がみられたので被験者ごとに分析を行った。分析結果をFig. 6.5 およびFig. 6.6 に示す。上下方向感の結果は無響室の場合に示した対照的な被験者Sub.1およびSub.2の結果のみ示した。Fig. 6.5 のI軸およびII軸とFig. 6.6 の各軸との間の相関係数をTable 6.2に示す。

会議室では白色雑音対および3種類の帯域雑音対を用いて実験を行った。帯域雑音対の音像の空間的印象の類似性判断のみ2名の被験者で行い、他はすべて4名の被験者で行った。試聴室の場合と同様に、音像の空間的印象の類似性判断、音像の拡がり感および距離感の判断では被験者はほぼ同じ傾向を示したので4名の判断の合計値を用いて分析し、上下方向感の判断では被験者によって異なる傾向がみられたので被験者ごとに分析を行った。分析結果をFig. 6.7 およびFig. 6.8 に示す。上下方向感の結果は無響室および試聴室の場合と同様に2名の同じ被験者Sub.1およびSub.2の結果のみ示した。また、Fig. 6.7(a)のI軸およびII軸とFig. 6.8 の各軸との間の相関係数をTable 6.3 に示す。

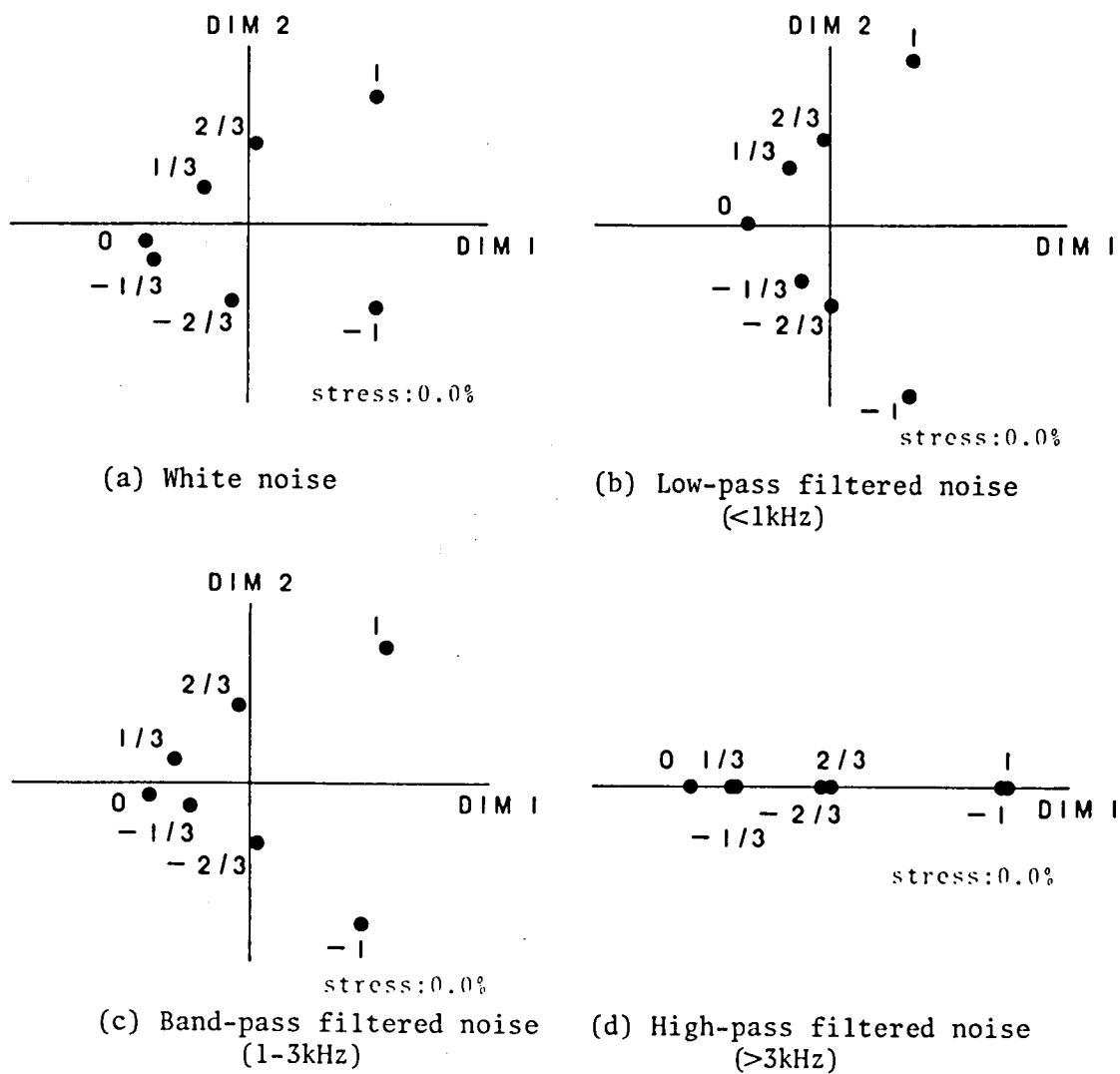
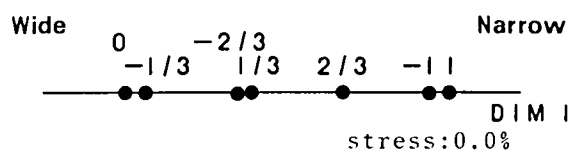
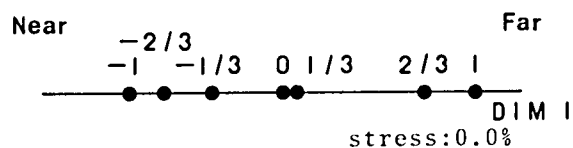


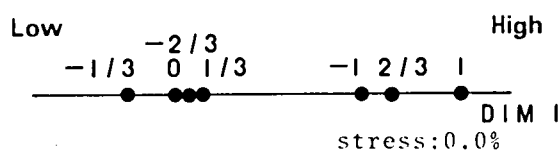
Fig. 6.7 Two-dimensional configurations of (a) white noises, (b) low-pass filtered noises (<1 kHz), (c) band-pass filtered noises (1-3 kHz), and one-dimensional configuration of (d) high-pass filtered noises (>3 kHz) with the various cross-correlation coefficients. These configurations shows that the spatial impressions of the sound image depend on approximately two independent psychological factors in the conference room, if the noises contain frequencies below 3 kHz.



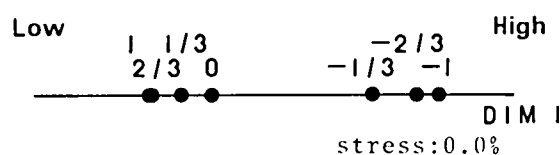
(a) Width



(b) Distance



(c) Elevation (Sub.1)



(d) Elevation (Sub.2)

Fig. 6.8 One-dimensional configurations of white noises concerning (a) width, (b) distance, (c) and (d) elevation of the sound image in the conference room, respectively.

Table 6.3 Correlation coefficients for six psychological scale value in the conference room. Dimensions I and II of Fig. 6.7 correspond very closely to the width and distance of the sound image, respectively.

	1	2	3	4	5	6
1:Dimension I of Fig.6.7(a)	1.00	0.15	0.98	0.19	0.88	0.04
2:Dimension II of Fig.6.7(a)		1.00	0.29	0.98	0.51	-0.92
3:Width			1.00	0.33	0.93	-0.11
4:Distance				1.00	0.58	-0.92
5:Elevation(Sub.1)					1.00	-0.37
6:Elevation(Sub.2)						1.00

Table 6.2およびTable 6.3から明らかなように、残響のある一般の部屋においても音像の空間的印象を規定する物理的要因および心理的要因は無響室の場合とほぼ等しいことが分かる。音像の拡がり感および距離感は残響特性および音圧などによっても変化すると考えられるが、ここで行った実験ではいずれの場合においてもこれらの物理的要因は一定である。したがって、このような条件下では音像の拡がり感および距離感は相関係数によって規定されることが分かる。ただし、会議室の場合には音像の空間的印象に及ぼす周波数帯の効果が無響室の場合と比較して顕著であり、3 kHz以上の高域雑音対に対しては距離感の差がまったく知覚できなくなるなど残響の効果が現れていると思われる。

なお、無響室の場合と同様に被験者の聴取位置にダミーヘッドマイクロホンを置き両耳間相関係数を測定したところ、 $r = 1, 0$ および -1 の白色雑音対に対して試験室ではそれぞれ0.87, 0.01および -0.81 、会議室ではそれぞれ0.76, -0.02 および -0.76 となり、残響時間の長い部屋ほど両耳間相関係数の絶対値は小さくなる傾向はあるが、ほぼ音響信号の相関係数は保たれていることが分かった。

6.5 結言

相関係数の異なる白色雑音対および帯域雑音対を無響室および残響のある部屋で2チャンネルスピーカ再生した場合の音像の空間的印象を調べ、以下のような結果を得た。

(1) 音像の空間的印象を規定する主要な心理的要因は、音像の拡がり感と距離感である。

(2) 音像の拡がり感に対応する物理的要因は雑音対の相関係数の絶対値であり、相関係数が0の場合に音像は最も拡がって知覚される。なお、この結果はヘッドホン受聴時の場合と同じである。

(3) 音像の距離感に対応する物理的要因は雑音対の相関係数そのものであり、相関係数が -1 の場合に音像は最も近くに知覚される。

(4) 音像の拡がり感の差異は高い周波数帯においても知覚されるが、距離感の差異は周波数帯が高くなるにしたがって知覚されにくくなる。この傾向は無響室の場合と比較して残響時間の長い部屋ほど著しい。

(5) 音像の上下方向感は、被験者による差が大きく、物理量との対応関係は客観的には定まらない。しかし、 $r = 1$ の雑音対を上方に知覚する被験者は比較的多く、ある程度は相関係数を変化することによって音像の上下方向感を制御することが可能であ

と思われる。

(6) この実験に用いた残響のある一般の部屋（残響時間が約 0.8秒以下）においても音像の空間的印象を規定する物理的要因および心理的要因は無響室の場合とほぼ同じである。すなわち，相関係数を変化することによって音像の拡がり感および距離感の制御を行うことが一般の部屋においてもできる可能性を示した。

第7章 音像の空間的印象の定量的表現⁽⁸³⁾

7. 1 概観

スピーカ再生における音像の定位方向は角度などを指標として定量的に示すことができる。一方、音像の定位方向以外の空間的印象を表現するには言語を使用したり、イメージとしてイラストで図示するなどの方法が用いられていたが、いずれにしても定性的な表現の域を出ることがなかった。そこで、音像の空間的印象を定量的に表現する手段としてマスキング量の空間的变化（以後、マスキングパターンと呼ぶ）を用いることを提案する。

マスキングパターンについてはこれまでにカクテルパーティ効果の方向依存性を定量的に表すことを目的とした幾つかの研究で報告されている。

Kock⁽⁸⁴⁾はマスカ（マスクする音）に白色雑音を、マスキー（マスクされる音）に音声を用い、それらの提示方向が互いに90° および180° 異なる場合のマスキング量を被験者の向きを変えて測定した。その結果、マスカとマスキーの両耳間時間差が同じになる方向に被験者が向いた場合にマスキング量が大きくなることを示した。Lochnerら⁽⁸⁵⁾はマスカに音声を、マスキーにはマスカの音声を20ms遅延させた信号音を用い、マスカを正面方向から提示し、マスキーの提示方向を変えてマスキングパターンを測定した。その結果、被験者の左または右方向からマスキーを提示した場合にマスキング量が小さくなることを示した。また、江端ら⁽⁸⁶⁾はマスカに雑音を、マスキーに純音を用いてマスキングパターンを測定し、ほぼLochnerらと同様な結果を得ている。さらに、Plomp⁽⁸⁷⁾はマスカに音声または音声とほぼ等しいスペクトルを持つ雑音を、マスキーに音声を用い、マスキーを正面方向から提示し、マスカの提示方向を変えてマスキングパターンを測定した。その結果、マスカを被験者の左または右方向から提示した場合にマスキング量が小さくなること、残響時間の長い部屋ではマスカの方向を変えてもマスキング量の変化は小さいこと、単耳受聴では音の聞こえる耳の方向でマスキング量が大きくなること、マスカが音声であるか雑音であるかによってはマスキングパターンに差のないことを明らかにした。なお、これらの研究においてはカクテルパーティ効果の方向依存性が顕著に現れる方向をマスキング量が小さくなる方向で示しているのであって、マスキングパターンが音像の空間的印象の差を表しているという解釈はなされていない。

このように、マスキングパターンは幾つかの研究において報告されてはいるが、系統的には示されていない。そこで、本章で、実音像および合成音像のマスキングパターン

を系統的に測定し、マスキングパターンが音像の空間的印象の差をよく表していることを示す。なお、単一のスピーカを用いて音響信号を再生した場合に生ずる音像を実音像、複数のスピーカを用いて音響信号を再生した場合に生ずる音像を合成音像と呼ぶことにする。

7. 2 基本的な考え方

聴取者の周囲に置いた1つのスピーカから信号音を提示した場合、スピーカの方によって音源から外耳道入り口までの伝達関数が異なり、聴取可能な信号音の最小レベルに差が生ずる。この単一音源（マスキー）とは別に妨害音源（マスカ）が存在すれば、単一音源からの音はマスキングを受け、聴取可能な信号音の最小レベルは上昇する。この時、単一音源からの音はすべての方向に対して一様なマスキングを受けるのではなく、妨害音の方向および拡がり感や距離感などの空間的印象の差によって異なったマスキングを受けると考えた。すなわち、マスキング量の空間的变化は音像の空間的印象と対応し、

- i) マスキーがマスカの音像に近づくほど大きなマスキングを受ける、
 - ii) マスカの音像が拡がっていれば大きなマスキングを受ける範囲は広くなる、
- と考えた。

7. 3 実音像のマスキングパターン（実験 1）

基本的な考え方の上に立って合成音像との比較を行うために、まず、実音像のマスキングパターンを測定した。

7. 3. 1 実験方法

実験は無響室でFig. 7.1 に示すスピーカ配置で行った。スピーカはほぼ耳の高さとし、被験者とスピーカの間には音響的に透明なカーテンを張り、視覚の影響を除いた。なお、スピーカには三菱製ダイヤトーンP-610A（キャビネット外径寸法；20×20×15(cm)）を用いた。

マスカはFC, FR, R, BRおよびBCのいずれか1つのスピーカを用いて提示した。マスカを左右対称な位置にあるスピーカ（FCとBC）を用いて提示した場合には、

マスキングパターンの左右対称性を仮定してマスキューは、右方向（FCおよびBCを含める）にあるスピーカを用いて提示し、マスカを左右非対称な位置にあるスピーカ

（FR、RおよびBR）を用いて提示した場合には、マスキューはすべてのスピーカを用いて提示した。マスカとマスキューには方向定位が比較的に正確に行える白色雑音を用い、Fig. 7.2 に示す時間間隔にしたがって提示した。すなわち、ランプの点滅で被験者に注意を促した後マスカを 1.5 秒間、マスキューをその中間で 300ms 提示した。マスカをマスキューよりも長く提示するこ

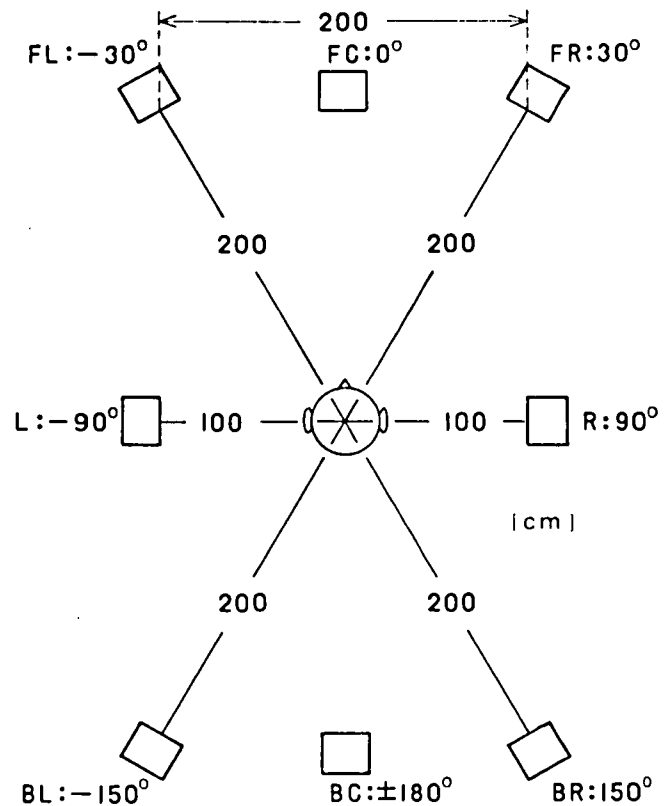


Fig. 7.1 Arrangement of loudspeakers for experiment I.

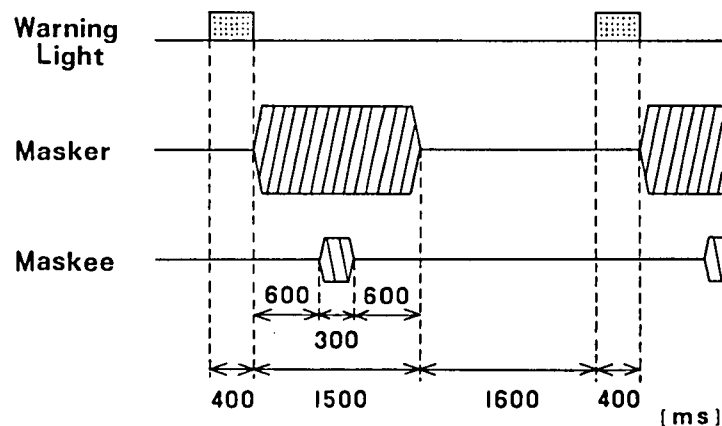


Fig. 7.2 Time sequence of warning light, masker, and maskee. Rise-fall time of the masker and the maskee is set at 50 ms. The masker level is held constant at 52 dBSL.

とにより、継時マスキングの効果を除いた⁽⁸⁸⁾。なお、マスカとマスキーの立ち上がりおよび立ち下がり時間はともに50msで、マスカの大きさは52dBSLで一定に保った。測定は極限法の下降系列で行い、マスキーを明らかに聞こえる大きさ（4種類とし、毎回ランダムに変化させた）から、2dBずつ減少させた。被験者は正常な両耳聴力を有する成人3名で、着座した後、頭を軽く頭部固定器で固定し、マスキーが「聞こえる」、「聞こえない」、「どちらとも言えない」の3段階で判断を行った。マスカおよびマスキーを提示するスピーカのすべての組み合わせに対して、いずれも21回の測定を行い、最大および最小値からそれぞれ3個のデータを除く中間の15個のデータの平均値をもって最小可聴値とした。

なお、測定を極限法の下降系列のみで行ったのは以下の理由による。

i) 予備実験を上昇および下降の両系列で行ったところ、被験者によって傾向は異なるが慣性または期待のいずれか一方の効果が作用し⁽⁸⁹⁾、系列間の測定値に大きな差を生じた。

ii) 予備実験では系列内での測定値の標準偏差は上昇系列よりも下降系列の方が小さかった。したがって、下降系列の方がより精度の高い測定が期待できる。

iii) マスキング量はマスカのある場合とない場合との最小可聴値の差であり、たとえ系列効果⁽⁹⁰⁾が存在したとしてもそれを差し引くことができる。

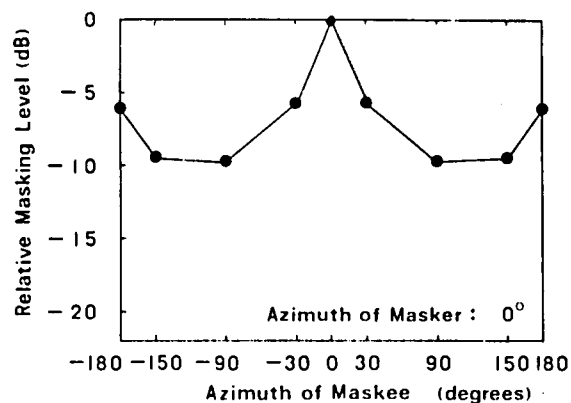
7.3.2 実験結果

3名の被験者による結果はほぼ同様な傾向を示したので、1名の結果についてのみ Fig. 7.3 に示す。Fig. 7.3 の横軸はマスキーを提示した方向で、縦軸はそれぞれの場合におけるマスキング量の最大値を0dBとする相対マスキング量である。測定値の標準偏差は、マスカのない場合で1.0dB以下、マスカのある場合で1.7dB以下である。

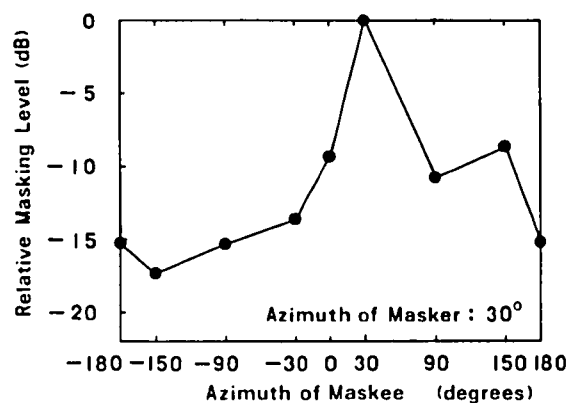
Fig. 7.3 はマスキング量がマスカと同じ方向すなわち実音像の生じている方向で最大値をとり基本的な考え方が正しいことを裏付けている。また、マスキング量は実音像の生じている方向と前後対称な方向（例えば Fig. 7.3(b)では実音像が30°方向にあるので150°方向）でも大きくなっている。一般に、8kHz以上の成分がない音響信号をスピーカ再生した場合には音像の定位を前後対称な方向に誤ることがある⁽²²⁾。すなわち、マスキングパターンの極大値と音像の定位方向とは密接な関係のあることが分かる。

さらに、Fig. 7.3 は実音像が前後対称な位置に定位している場合（例えば Fig. 7.3(a)と(e)）のマスキングパターンに差のあることを示している。この差は音源から

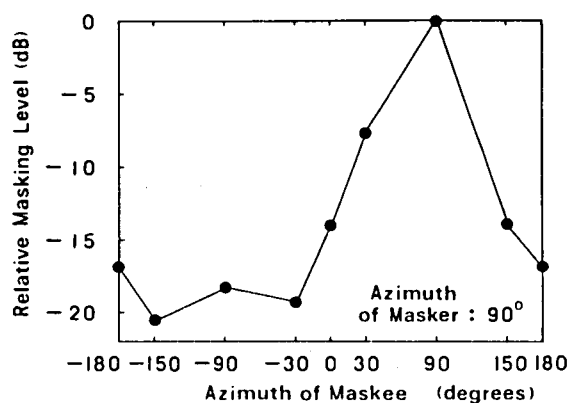
の伝達関数が音源が前方にある場合と後方にある場合に異なっている影響と考えられるが、このことは白色雑音を信号音に用いた場合には定位の前後判断をある程度正しく行えることに対応している(22)。



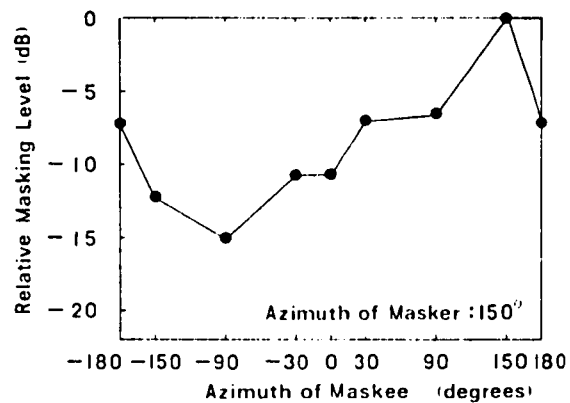
(a)



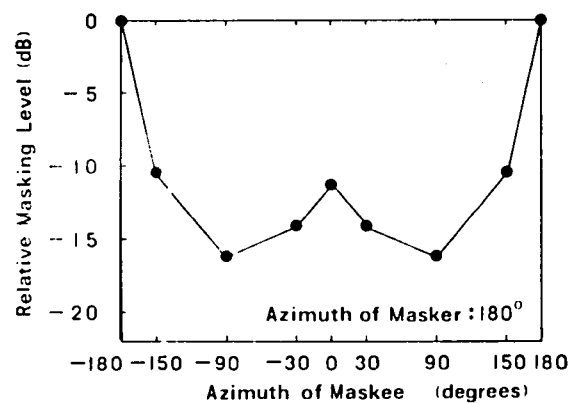
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 7.3 Masking patterns of the real sound image. Azimuths of the real sound image are (a) 0°, (b) 30°, (c) 90°, (d) 150°, and (e) 180°.

実験 I では、マスキャーを単一のスピーカから 52dB SL と一定に保って提示したので、いずれの場合においても最大マスキング量は 39~41dB であった。すなわち、Fig. 7.1 に示すスピーカ配置では、最大マスキング量はスピーカの方角にはほとんど依存しないことが分かった。

また、Fig. 7.3 にはいずれの場合においても、マスキング量の小さくなる方向（例えば Fig. 7.3(b) では -150° 方向）がある。このマスキングを受けにくい方向では、カクテルパーティ効果の一要因である方向依存性の影響が顕著に現れることが推定される。

7.4 合成音像のマスキングパターン（実験 II）

実音像のマスキングパターンは音像の空間的印象と非常によい対応関係のあることが明らかになった。そこで 2 チャンネルスピーカ再生による合成音像のマスキングパターンを実音像のマスキングパターンと比較することにより、合成音像の定位方向や拡がりの程度などが評価できると考えた。

7.4.1 実験方法

実験は無響室で実音像のマスキングパターンとほぼ同じ方法で行った。ただし、合成音像は一般に提示したスピーカ方向に定位しないこと、拡がり感、距離感、上下方向感にも実音像と差のあることから、マスキャーを提示するスピーカを増やし Fig. 7.4 に示すスピーカ配置で実験を行った。Fig. 7.4 (a) において被験者の頭上 20cm に置い

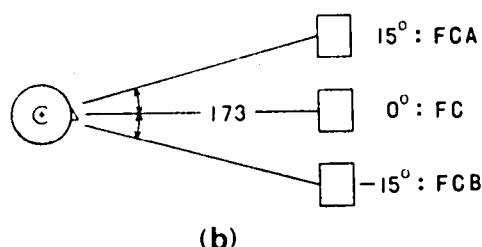
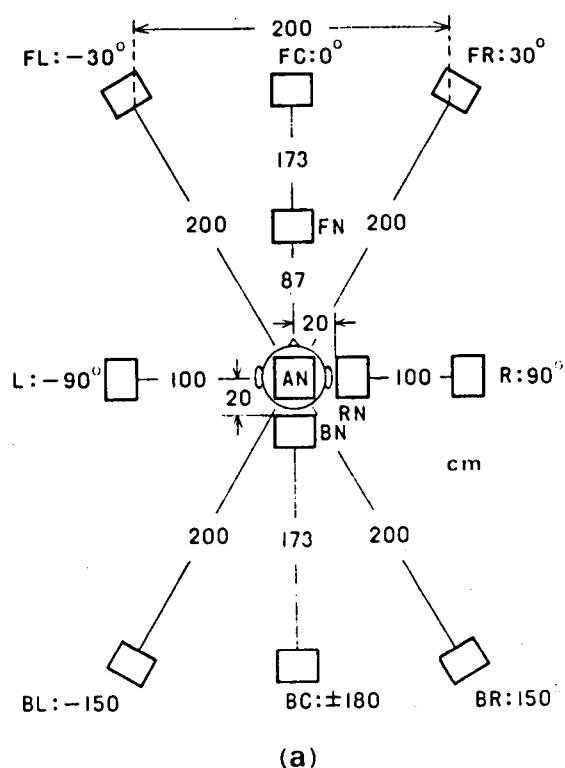


Fig. 7.4 Arrangement of loudspeakers for experiment II.

たスピーカAN以外のスピーカはほぼ耳の高さである。また、Fig. 7.4(b)のスピーカはすべて正中面内に置いた。マスカは被験者前方 $\pm 30^\circ$ 方向の2つのスピーカFLおよびFRを用いて提示し、マスキーはすべてのスピーカを用いて提示した。

マスカには音像の拡がり感と距離感が互いに最も異なる相関係数 $r = 1, 0$ および -1 の3種類の白色雑音対を用い、いずれも52dBSLで提示した。

7.4.2 実験結果

被験者は正常な両耳聴力を有する成人2名ないし3名で、結果はほぼ同様な傾向を示したので1名の結果についてのみ示す。測定値の標準偏差はマスカの無い場合で1.0dB以下、マスカのある場合で1.3dB以下である。

(A) 水平方向のマスキングパターン

マスキーをFC, FR, R, BRおよびBCから提示した場合のマスキングパターンを左右対称性を仮定してFig. 7.5に示す。Fig. 7.5(a)にはマスカが正面方向の実音を

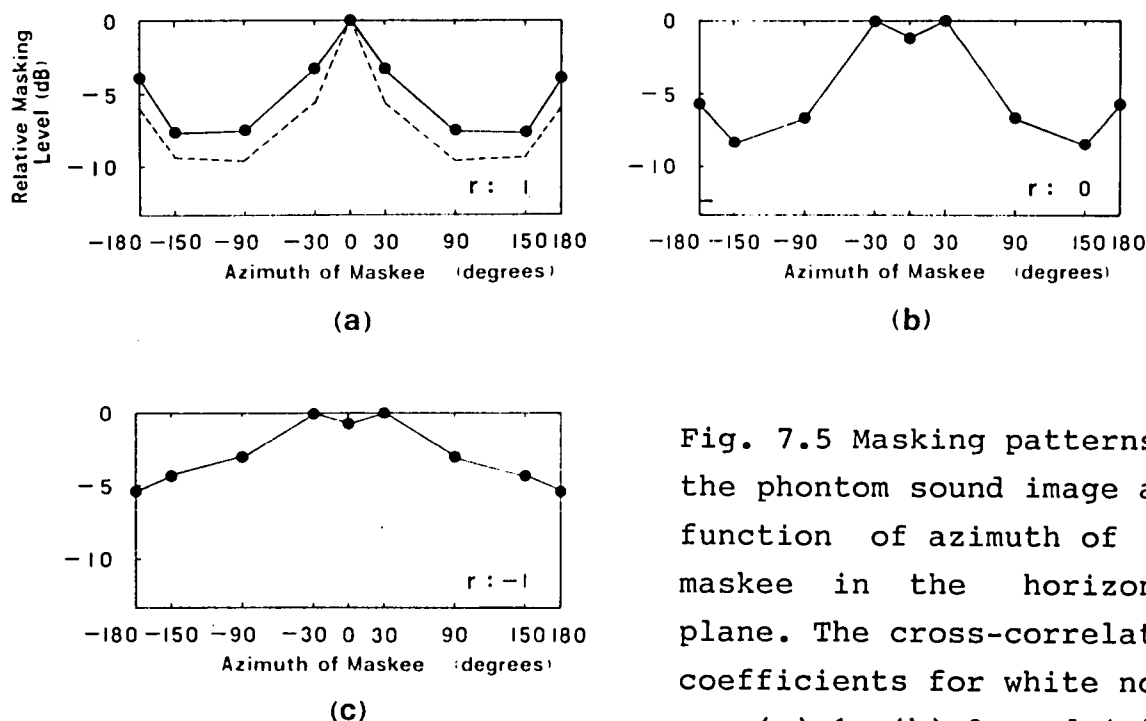


Fig. 7.5 Masking patterns of the phantom sound image as a function of azimuth of the maskee in the horizontal plane. The cross-correlation coefficients for white noise are (a) 1, (b) 0, and (c) -1.

像である場合のマスキングパターン (Fig. 7.3(a)) を併せて破線で示した。

Fig. 7.5(a)は $r = 1$ の合成音像のマスキングパターンが正面方向で最大値(37.2dB)をとること、正面方向の実音像のマスキングパターンより拡がっていることを示している。このことは $r = 1$ の合成音像は正面方向に定位するが、実音像より拡がっているという被験者の空間的印象と一致している。すなわち、マスキングパターンは音像の定位方向のみでなく拡がりの程度まで表していることが明らかになった。

$r = 0$ の合成音像のマスキングパターンは $\pm 30^\circ$ 方向で最大値 (39.8dB) をとり、音像が $\pm 30^\circ$ 方向まで拡がっていることを示している。これは音像がスピーカとほぼ同じ程度にまで拡がっているという被験者の空間的印象と一致している⁽⁹¹⁾。 $r = 0$ の場合のマスキングパターンは被験者によって多少傾向が異なり、正面方向でマスキング量が最大となることもある。しかし、その場合においても $\pm 30^\circ$ 方向まではマスキング量が大きく、音像が拡がっていることを示していることには変わりがない。

$r = -1$ の合成音像のマスキングパターンは $\pm 30^\circ$ 方向で最大値 (32.2dB) をとり、一見音像が拡がっていることを示している。したがって、このパターンは $r = -1$ の音像が被験者の頭内あるいは後頭部付近に定位し、幅の狭い音像であるという空間的印象とは一致していないように見える。この理由の1つとしては、最大マスキング量が32.2 dBと他と比較して小さいことから分かるように、マスキーを提示したスピーカの位置に、 $r = -1$ の音像が定位していないことが考えられる。すなわち、合成音像の空間的印象をより明確にマスキングパターンで示すためには、最大マスキング量が実音像の場合と同程度 (約39~41dB) になる位置にマスキーを置く必要があると思われる。

(B) 上下方向のマスキングパターン

マスキーをFCA、FCおよびFCBから提示した場合のマスキングパターンをFig. 7.6 に示す。Fig. 7.6 にはマスカをスピーカFCから提示した場合、すなわち、マスカが正面方向の実音像である場合も併せて示した。

Fig. 7.6 は上下方向のマスキング量の変化が仰角 $\pm 15^\circ$ の範囲では小さいことを示している。このことは、音像の上下方向の判断が一般に水平方向の判断と比較して困難であることに対応している。マスキング量の変化が小さいので t 分布検定を行った。その結果、 $r = 1$ の場合の仰角 0° と 15° の間で危険率1%の有意差が認められた。すなわち、マスキングパターンは $r = 1$ の合成音像が水平面よりも上昇していることを示しており、被験者の空間的印象と一致した⁽⁷¹⁾。

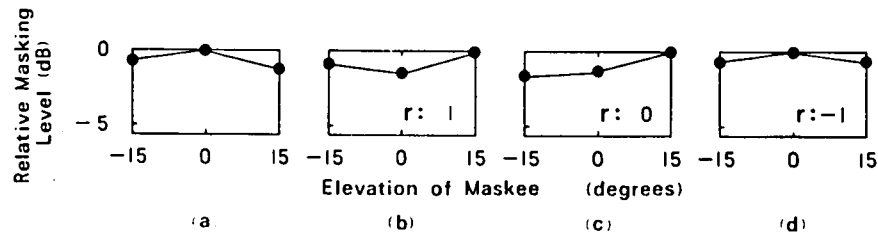


Fig. 7.6 Masking patterns of (a) the real and (b), (c), and (d) the phantom sound image as a function of elevation of the maskee in the median plane. The maskee is reproduced from three loudspeakers (FCA, FC, and FCB in Fig. 7.4).

(C) 前後方向のマスキングパターン

マスキーをFC, FN, AN, BNおよびBCから提示した場合のマスキングパターンをFig. 7.7 に示す。

Fig. 7.7 はいずれの場合においても前方向と後方向ではマスキング量に大きな差のあること, それぞれの方向では距離による差の小さいことを示している。このことは, 音像の前後方向感は比較的判断しやすいが, 距離感は判断が難しいことに対応している。

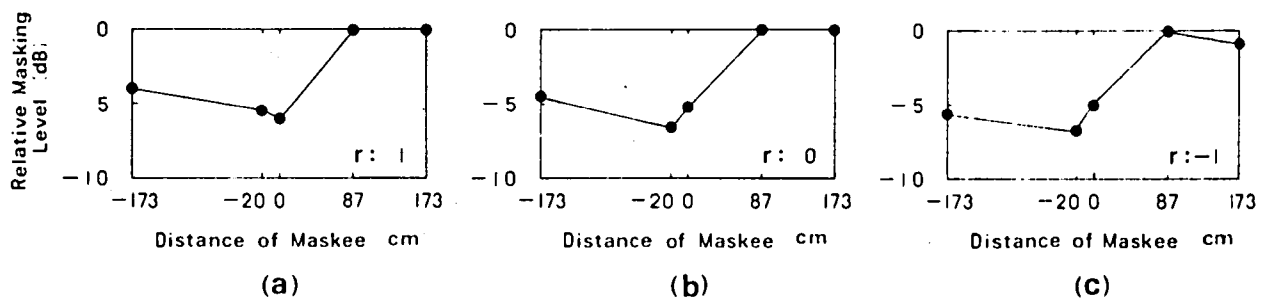


Fig. 7.7 Masking patterns of the phantom sound image as a function of distance of the maskee in the median plane. The maskee is reproduced from five loudspeakers (FC, FN, AN, BN, and BC in Fig. 7.4).

(D) 左右方向のマスク キングパターン

マスクーをR, RNおよびANから提示した場合のマスクキングパターンをFig. 7.8 に示す。

Fig. 7.8 は左右方向の距離によるマスクキング量の変化が小さいことを示している。これは左右方向においても距離感の判断が難しいことに対応している。

7. 4. 3 検討

Fig. 7.5 から Fig. 7.8 までに示したように、合成音像の空間的印象とマスクキングパターンは非常によい対応関係のあることが分かった。ただし、 $r = -1$ の合成音像の空間的印象を明確に表すマスクキングパターンはFig. 7.4 に示すスピーカ配置からは得られなかった。そこで次の実験を行った

$r = -1$ の合成音像は頭内または後頭部付近に定位するので、マスクーをオープンエアタイプヘッドホン (Sennheiser 社製 HD 414) を用いて提示し、マスクーの音像を頭内に定位させてマスクキング量の測定を行った。なお、マスク力は Fig. 7.4 に示すスピーカ FLおよびFRを用いて提

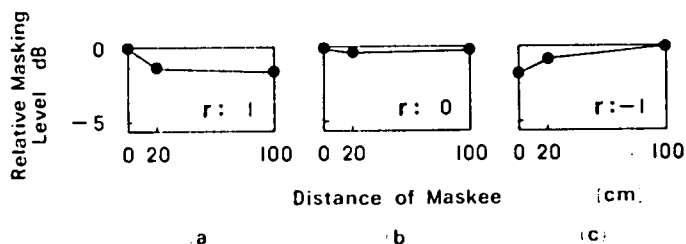


Fig. 7.8 Masking patterns of the phantom sound image as a function of distance of the maskee in the lateral plane. The maskee is reproduced from three loudspeakers (R, RN, and AN in Fig. 7.4).

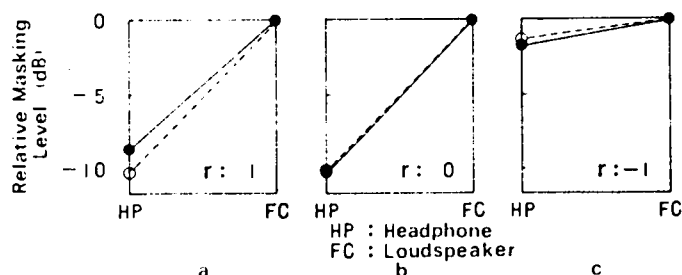


Fig. 7.9 Relative masking level. Maskee is reproduced from the headphones and the loudspeaker (FC in Fig. 7.4). The phase differences between the two ears are 0° (●) and 180° (○) for headphones presentation.

示した。測定はマスキーをスピーカで提示した場合とまったく同様な方法で行った。ヘッドホンの装着による影響を除くために、ヘッドホンを装着してマスキーをFig.7.4のスピーカFCから提示した場合の測定も行った。 $r = 1, 0$ および -1 の合成音像によるマスキング量をFCを用いてマスキーを提示した場合を基準としてFig. 7.9 に示す。ヘッドホンでマスキーを提示した場合の●および○印はそれぞれマスキーが同位相および逆位相であることを示す。Fig. 7.9 は、マスキーの音像が頭外（FCの位置）にある場合と頭内にある場合の差を示しており、 $r = -1$ の場合にはその差の小さいことが分かる。すなわち、 $r = -1$ の場合には、マスキーの音像が頭内にある場合に、相対的に大きなマスキングを受けている。このことは、 $r = -1$ の音像が頭内または後頭部付近に定位するという空間的印象に関連があると思われる。

7. 5 ヘッドホン再生による音像のマスキングパターン（実験 III）

スピーカ再生による音像のマスキングパターンはよく空間的印象と対応することが明らかとなった。そこでヘッドホン再生による音像のマスキングパターンを測定した。

7. 5. 1 マスキーをスピーカを用いて提示した場合

マスカ、マスキーともに白色雑音を用い実験 I とほぼ同様な方法で測定した。ただし、マスカはオープンエアタイプヘッドホンを用いて52dBSLで提示し、マスキーは Fig. 7.4 に示すスピーカFC, FR, R, BR, BC および AN を用いて提示した。なお、ヘッドホンを用いてマスカを提示したので、その音像は頭内に定位している。Fig. 7.10に水平面内および正中面内のマスキングパターンを示す。

Fig. 7.10は $r = 1$ の音像のマスキング量は 0° および 180° 方向で最大値（41.3 dB）をとることを示している。これは、 $r = 1$ の音像は拡がり感が小さく、頭内の正中面内に定位していることに対応している。

$r = 0$ の場合は $\pm 90^\circ$ 方向で最大マスキング量（42.2dB）をとり、音像が両耳に分離しているという空間的印象と一致している。

$r = -1$ の場合は音像の拡がり感が小さいことを明確に示すパターンではないが、 $\pm 30^\circ$ 方向で最大マスキング量（36.4dB）をとり他の場合と比較してマスキング量の小さいことが分かった。

また、前方向と後方向のマスキング量の差は小さく、音像が頭内に定位していること

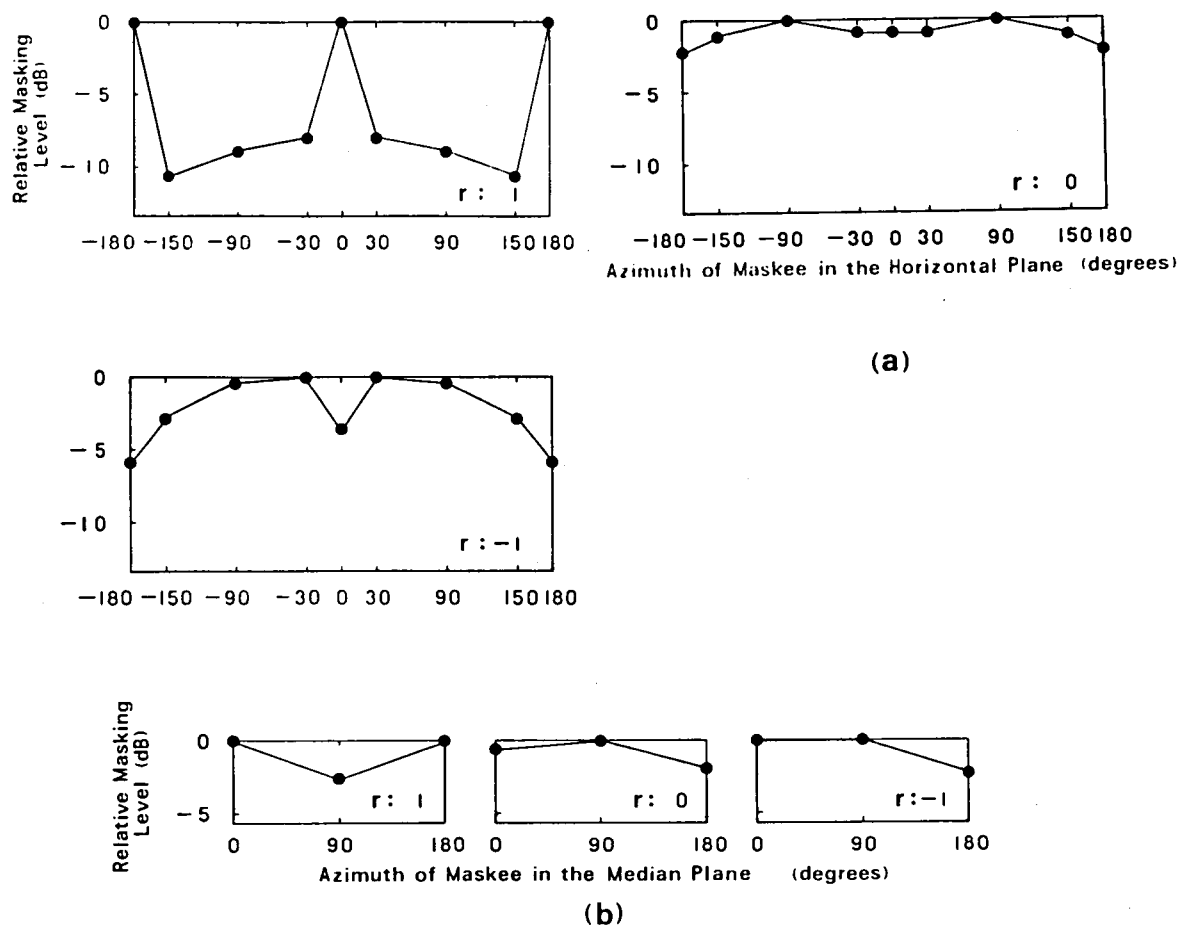


Fig. 7.10 Masking patterns of the sound image as a function of azimuth of the maskee in (a) the horizontal and (b) the median plane. The masker is reproduced through the headphones and the maskee from the loudspeakers.

を示唆している。

7. 5. 2 マスキーをヘッドホンを用いて提示した場合

マスカ、マスキーとも密閉型ヘッドホン (DT 48) を用いて提示した。マスカには $r = 1, 0$ および -1 の白色雑音対を用い、52dB SLで提示し、継続時間を 1.9秒とした。マスキーは 500Hz純音を用い左右同位相で、マスカの立ち上がり 700ms後に継続時間を 500 msとして提示した。なお、マスカ、マスキーとも立ち上がりおよび立ち下がり時間を 50msとした。実験は調整法によって行い、マスキーの強度差によるマスキング量の変化を測定した。結果を Fig. 7.11に示す。横軸はマスキーの強度差で、マスキーの音像

は強度差 0 dB の場合には正中面内に定位し，40 dB の場合にはほぼ耳の付近に定位する。

Fig. 7.11 は， $r = 1$ の音像は正中面内に定位していること， $r = 0$ の場合にはマスクーの強度差が 5 dB 以上の範囲で他の場合よりも大きなマスキングを受け，両耳に音像が分離していることを示している。また，この場合においても， $r = -1$ のマスキングパターンは $r = -1$ の音像の拡がり感が比較的小さいという被験者の空間的印象とは一致しない。これは， $r = -1$ の音像は後頭部付近に定位するが同位相で強度差 0 dB の純音の音像は頭内の中央で比較的上方に定位すること，すなわち，マスカとマスクーの音像の定位に差があることによるのではないかと考えられる。

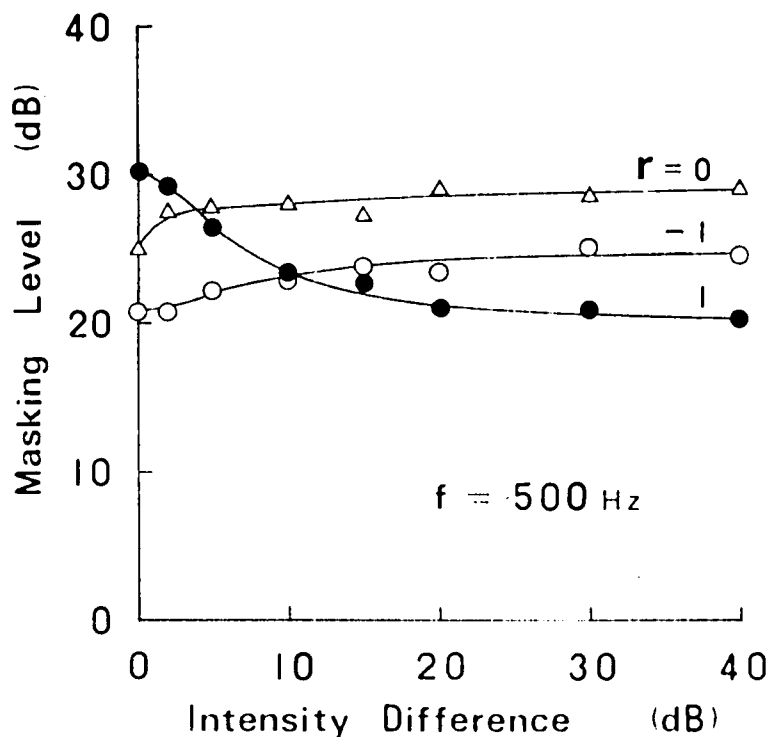


Fig. 7.11 Masking patterns of the sound image as a function of intensity difference of the maskee. The maskee is a 500 Hz tonal signal. The masker and the maskee are reproduced through the headphones.

7. 6 従来の研究結果に対する考察

ここで示した実音像のマスクングパターンの一部は、すでに述べたように、幾つかの研究で測定されている。しかし、それらの研究はカクテルパーティ効果の方向依存性を定量的に示す目的で行われており、系統的にすべての方向の測定は行われていなかった。また、マスクングパターンが音像の空間的印象を表すという解釈もなされていない。しかし、これらの研究結果に対してはこの論文で示した基本的な考え方から以下の解釈が可能である。Kock⁽⁸⁴⁾の結果は、音像の定位方向および定位を誤りやすい方向でマスクング量が大きくなること、Lochnerら⁽⁸⁵⁾および江端ら⁽⁸⁶⁾の結果はマスクング量が音像の定位方向で大きくなること、音像の定位を誤りにくい方向で小さくなることを示していると解釈できる。さらに、Plomp⁽⁸⁷⁾が示した「残響時間の長い部屋ではマスクの方向を変えてもマスクング量の変化は小さい」ことは残響時間の長い部屋では左右耳に加わる音響信号間の相関係数が小さくなり音像の拡がり感が大きくなることに、また、「単耳受聴では音の聞こえる耳の方向でマスクング量が大きくなる」ことは単耳受聴では音像の定位が音の聞こえる耳の方向へ偏ることに対応している。

7. 7 結言

音像の空間的印象をマスクング量を用いて記述する方法を提案し、実音像および合成音像のマスクングパターンを測定した。その結果、マスクングパターンは音像の空間的印象とよく対応し、音像の空間的印象を記述する方法として優れていることが分かり、以下の知見を得た。

(1) マスクングパターンは音像の定位方向と密接な対応関係があり、音像の定位方向で最大値をとる。また、定位を誤りやすい前後対称な方向で極大値をとる。

(2) マスクングパターンは音像の拡がり感とよく対応し、音像の拡がり感が大であれば、大きなマスクングを受ける範囲は広がる。すなわち、マスクングパターンにより $r = 1$ の合成音像は正面方向の実音像より拡がっていること、 $r = 0$ の音像はスピーカの間隔とほぼ同じ程度に拡がっていることを示した。

(3) 上下方向のマスクング量の変化は小さいが、マスクングパターンは $r = 1$ の合成音像が正面方向の実音像より上方に定位していることを示している。

(4) 前後方向および左右方向においてはマスクーの距離を変えてもマスクング量の変化は小さく、マスクングパターンは距離によってはほとんど変化しないことが分かった。

これは音像の距離感の判断が困難であることに対応している。

(5) マスキーをオープンエアタイプヘッドホンを用いて提示して調べた結果、 $r = -1$ の合成音像が頭内あるいは後頭部付近に定位する現象と関連のあるマスキングパターンが得られた。

(6) ヘッドホン再生による音像のマスキングパターンも空間的印象と比較的よく対応していることが分かった。

(7) カクテルパーティ効果の方向依存性の影響が顕著に現れる方向をマスキング量の小さくなる方向で示した。

第8章 相関係数変化法による新しい音像の拡がり感制御方式⁽⁹¹⁾

8.1 概観

単一の音響信号をステレオ化し、音像に拡がり感を付加するいわゆる擬似ステレオ方式には多くの方式が提案されており、TV音声多重受信機等に広く応用されている⁽⁹²⁾。しかし、これらの方式には統一的な設計基準はなく、試行錯誤的な要素が多分に含まれている。そこで、「左右の音響信号の相関係数が0（かつ独立）であれば音像の拡がり感は最大となる」という知見を利用した新しい擬似ステレオ方式を提案する。

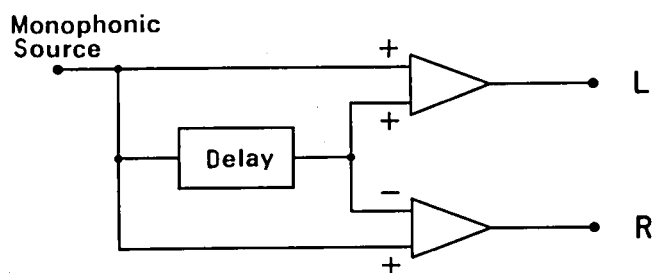
本章では、まず、従来の擬似ステレオ方式を概観したのち、新しい擬似ステレオ方式として帯域分割式および移相式の2方式を提案する。次に、心理実験により帯域分割式擬似ステレオ方式の有効性を確認する。なお、本章では表記を簡単にする目的で角度をラディアンで表す。

8.2 従来の擬似ステレオ方式

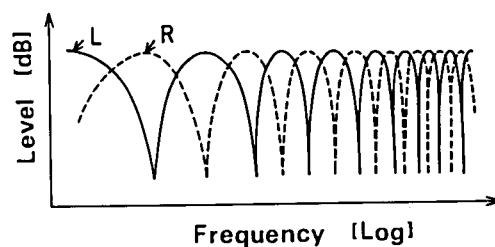
以下に述べる4方式が主なものである。

8.2.1 くし型フィルタ方式

Lauridsen⁽⁹³⁾の考案によるもので、単一の音響信号を通過帯域を交互に異にする相補的くし型フィルタに通し2チャンネル音響信号を得る方式である。Fig. 8.1(a)に系統図を示す。原音響信号を2～10msの遅延回路に通し、原音響信号に左右それぞれ同位相および逆位相として付加する。したがって、左右の音響信号の振幅－周波数特性はFig. 8.1(b)に示すようになる。なお、5.4



(a) Block Diagram



(b) Amplitude Frequency Characteristics

Fig. 8.1 Comb-filter type quasi-stereophonic system.

節では、遅延回路の遅延時間を約10ms程度にすれば過渡成分の少ない定常的な音響信号においてもほぼ十分な拡がり感の得られることを示した。

この方式では比較的明確な拡がり感が得られるが、音響信号の周波数成分の変化によって音像が左右に大きく移動する欠点が生じる。

8.2.2 残響音付加方式

残響音を原音響信号に付加する方式である。一般には複数個の遅延回路（遅延時間：10～数10ms）を用い等価的に残響音を形成し、左右に異なる遅延信号を付加することで実現している⁽⁸⁴⁾。

また、Lochnerら⁽⁸⁵⁾は単一の音響信号を残響室で再生・收音することによって残響音を得たのち、左右のスピーカから原音響信号を逆位相で、残響音を同位相で提示すれば音像が拡がると報告している。

この方式では音に包みこまれるような感じ、いわゆるアンビエンス(ambience)が得られるが、原音にない残響音を付加するので、音質が原音と異なってくる。

8.2.3 Schroeder方式

Schroeder⁽⁹⁵⁾は全帯域通過形擬似ステレオ方式としてFig. 8.2 およびFig. 8.3

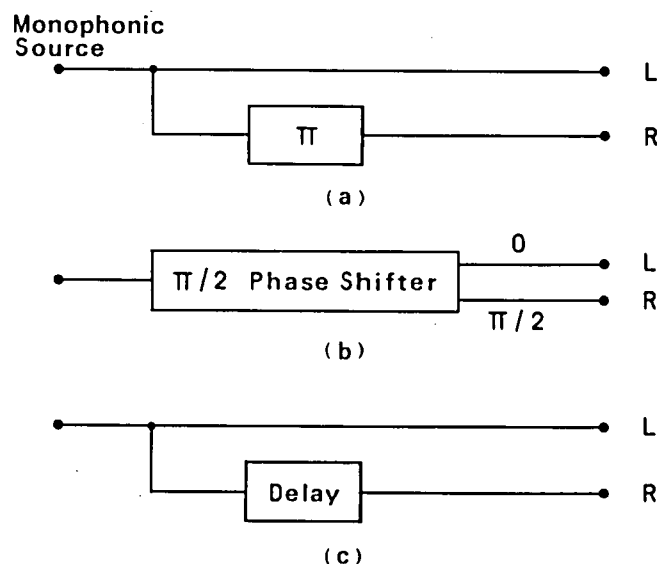


Fig. 8.2 All-pass filter type quasi-stereophonic systems.

に示す方式を提案している。

Fig. 8.2 はいずれも単純な方式であり、それぞれ(a) 左右逆位相で提示する方式、(b) $\pi/2$ 移相回路により全帯域にわたり左右の音響信号の位相差を $\pi/2$ とする方式および(c) 一方のチャンネルに遅延回路を挿入する方式である。

Fig. 8.3 は単一の音響信号を複数の帯域通過フィルタを用いて分割したの

ち、原音響信号に対して交互に位相が $\pi/2$ および $-\pi/2$ となるような信号を作り、原音響信号と $\pm \pi/2$ 位相の変化した音響信号を2チャンネル音響信号とする方式である。

これらの方式はいずれも振幅-周波数特性が平坦であり音質の変化はないが、Schroeder自身が述べているように明確な拡がり感は得られない。

8. 2. 4 高域周波数帯反転方式

400~ 500Hz以下の低域周波数帯を左右同位相で提示し、それ以上の高域周波数帯を左右逆位相で提示する方式である。比較的回路構成が簡単なのでよく用いられる方式である。

この方式では音像の移動感は小さいが、拡がり感が十分に得られず、不自然感も生じやすい。

8. 3 新しい擬似ステレオ方式

第7章までに明らかにしたように、音像の拡がり感は左右の音響信号の相関係数の絶対値に対応し、相関係数が0(かつ独立)であれば音像は最も拡がって知覚される。これは白色雑音対を用いて調べた結果ではあるが、一般の音楽のように周波数成分が広帯域にわたっている場合にも適用できると考えた。すなわち、単一の音響信号を左右の2

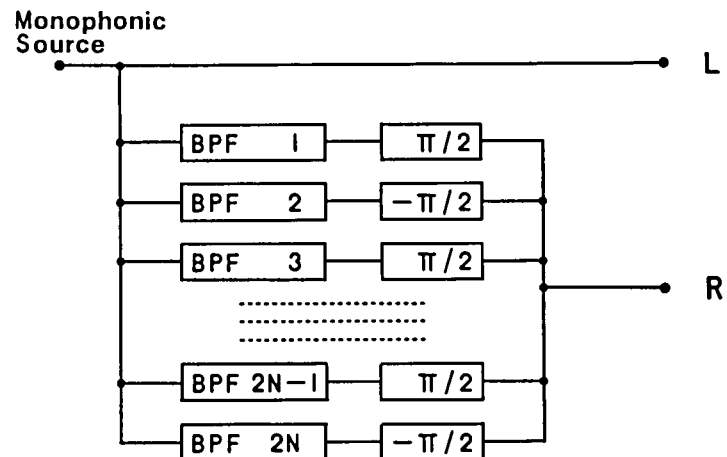


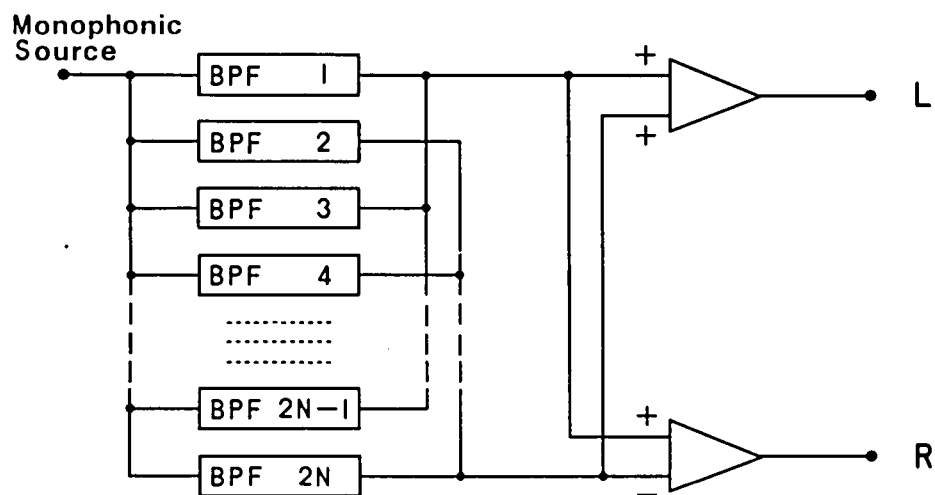
Fig. 8.3 Quasi-stereophonic system proposed by Schroeder.

チャンネル信号に分歧し，それらの相関係数を何らかの操作により 0 に近づければ音像は拡がって知覚され，相関係数の絶対値を変化すれば音像の拡がり感の制御ができると期待できる。

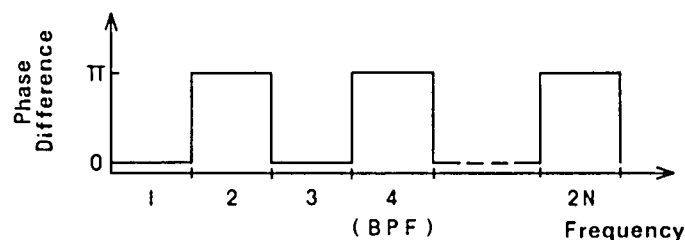
相関係数を 0 に近づける方法として，基本的には次の 2 つの方式を考えた。

8.3.1 帯域分割方式

単一の音響信号を複数個の帯域通過フィルタにより分割し，奇数番目の帯域を同（あるいは逆）位相，偶数番目の帯域を逆（あるいは同）位相とする方式である。 Fig. 8.4(a)に系統図を， Fig. 8.4(b)に左右の音響信号の位相差一周波数特性を示す。なお，この方式の振幅一周波数特性は左右とも平坦であり，全帯域通過形となっている。



(a) Block Diagram



(b) Phase Difference Frequency Characteristic

Fig. 8.4 Band-pass filter type quasi-stereophonic system.

ここで音響信号が白色雑音である場合についてこの方式で得られる左右の音響信号の相関係数 r を求める。

左右の音響信号をそれぞれ $L(t)$, $R(t)$ とする。また、同位相の帯域幅の和を B_0 , 逆位相の帯域幅の和を B_π とする。また、左右の音響信号における同位相成分を $n_0(t)$, 逆位相成分を $n_\pi(t)$ とすれば、

$$\left. \begin{aligned} L(t) &= n_0(t) + n_\pi(t) \\ R(t) &= n_0(t) - n_\pi(t) \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

と表すことができる。(8.1)式を(2.1)式に代入し、 $n_0(t)$ と $n_\pi(t)$ では周波数帯が異なるので直交することを利用すれば、次式が得られる。ただし、 $\tau = 0$ とした。

$$r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [n_0^2(t) - n_\pi^2(t)] dt}{\frac{1}{T} \int_0^T [n_0^2(t) + n_\pi^2(t)] dt} \quad (8.2)$$

白色雑音のパワースペクトル密度関数はすべての周波数帯で等しいので(8.2)式は、

$$r = \frac{B_0 - B_\pi}{B_0 + B_\pi} \quad (8.3)$$

となる。したがって、

$$B_0 = B_\pi \quad (8.4)$$

の場合に相関係数は0となる。また、 B_0 と B_π の割合を変化させて相関係数を1から-1まで連続的に変えることができるので音像の拡がり感の制御が可能であると思われる。

一般の音響信号の場合にはパワースペクトル密度関数がすべての周波数に対して一定ではないので相関係数を完全に0にすることは困難であるが、同位相の帯域と逆位相の帯域を交互にしかも狭くすることによって相関係数を0に近づけることは可能である。したがって、この方式によって得られる音響信号を左右のスピーカで再生すれば、くし型フィルタ方式にみられた音像の左右方向の移動はなく、良好な拡がり感の得られることが期待できる。

8.3.2 移相方式

帯域分割方式では多数個の帯域通過フィルタを必要とするので回路構成が多少繁雑と

なる。これを改善するために移相器を用いる方式を提案する。Fig. 8.5(a)に系統図を示す。この方式は一方のチャンネルに移相器を用いるだけなので回路構成は比較的簡単である。Fig. 8.5(b)は移相器の位相一周波数特性を示し、移相量は周波数の対数に対して直線的に変化する。

次に、音響信号が帯域雑音である場合についてこの方式で得られる左右の音響信号の相関係数を求める。

帯域雑音の周波数成分は f_L から f_H ($f_L < f_H$) であるとする。左右の音響信号 $L(t)$ および $R(t)$ における周波数 f の成分をそれぞれ $n_f(t)$ および $m_f(t)$ とし、それらの位相差を θ_f ($0 \leq \theta_f \leq 2\pi$) とすれば、

$$\left. \begin{aligned} n_f(t) &= a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_{f_0}) \\ m_f(t) &= a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_{f_0} - \theta_f) \end{aligned} \right\} \quad (8.5)$$

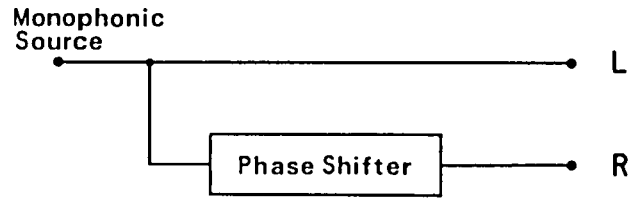
と表すことができる。ただし、 $a_f(t)$ は周波数 f における雑音の振幅であり、 θ_{f_0} は初期位相角である。したがって、

$$\left. \begin{aligned} L(t) &= \int_{f_L}^{f_H} n_f(t) df \\ R(t) &= \int_{f_L}^{f_H} m_f(t) df \end{aligned} \right\} \quad (8.6)$$

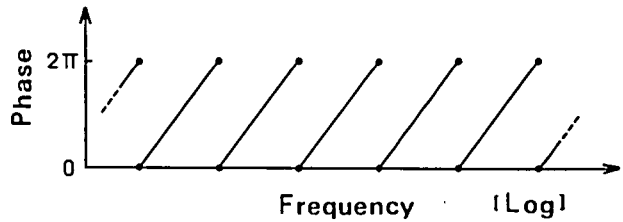
である。左右の音響信号の相関係数は (2.1)式および (8.6)式より

$$r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \int_{f_L}^{f_H} m_f(t) df \cdot \int_{f_L}^{f_H} n_f(t) df \right\} dt}{\left[\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \int_{f_L}^{f_H} m_f(t) df \right\}^2 dt \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \int_{f_L}^{f_H} n_f(t) df \right\}^2 dt \right]^{1/2}} \quad (8.7)$$

となる。ただし、 $\tau = 0$ とした。(8.7)式に (8.5)式を代入し、周波数の異なる成分が



(a) Block Diagram



(b) Phase Frequency Characteristic

Fig. 8.5 Phase shifter type quasi-stereophonic system.

直交することを利用すれば,

$$\begin{aligned}
 r = \lim_{T \rightarrow \infty} & \left[\frac{1}{T} \int_0^T \int_{f_L}^{f_H} a_f^2(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_{f_0} - \theta_f) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_{f_0}) df dt \right] \\
 & \times \left[\frac{1}{T} \int_0^T \int_{f_L}^{f_H} a_f^2(t) \cdot \cos^2(2\pi f t + \theta_{f_0} - \theta_f) df dt \right]^{-1/2} \\
 & \times \left[\frac{1}{T} \int_0^T \int_{f_L}^{f_H} a_f^2(t) \cdot \cos^2(2\pi f t + \theta_{f_0}) df dt \right]^{-1/2}
 \end{aligned} \quad (8.8)$$

となる。帯域雑音のパワースペクトル密度関数がすべての周波数で等しいと仮定すれば,

$$r = \frac{\int_{f_L}^{f_H} \cos \theta_f df}{f_H - f_L} \quad (8.9)$$

が得られる。ここで移相器により位相がオクターブあたりちょうど π だけ変化すると仮定すれば,

$$\theta_f = \frac{\pi}{\log_e 2} \cdot \log_e \frac{f}{f_0} + 2k\pi \quad (8.10)$$

と表すことができる。ただし、周波数 f_0 では位相差が 0 であるとし、 k は θ_f を $0 \leq \theta_f \leq 2\pi$ とする整数である。(8.9)式の被積分関数は \cos 関数であるから、適当な f_L および f_H を与えれば $r = 0$ とすることができる。また、帯域を広くすれば r は 0 に近づくことが分かる。

ここで Fig. 8.5 に示す移相回路と単なる遅延回路の動作の比較を行う。

一般に、回路の伝達関数 $G(j\omega)$ は,

$$G(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{-j\theta(\omega)} \quad (8.11)$$

と表すことができる。また、群遅延特性 $\tau(\omega)$ は,

$$\tau(\omega) = \frac{d\theta(\omega)}{d\omega} \quad (8.12)$$

で定義される。

まず、遅延回路の場合には,

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= 1 \\ \theta(\omega) &= c \cdot \omega \end{aligned} \right\} \quad (8.13)$$

とみなすことができる。ここに c は定数である。したがって,

$$\tau(w) = c \quad (8.14)$$

となり群遅延特性は周波数にかかわらず一定となる。

次に、Fig. 8.5 の移相回路の場合には(8.10)式を仮定すれば、

$$\left. \begin{aligned} A(w) &= 1 \\ \theta(w) &= \frac{\pi}{\log_e 2} \cdot \log_e \frac{w}{w_0} + 2k\pi \end{aligned} \right\} \quad (8.15)$$

となる。ここに $\omega = 2\pi f$ である。したがって、

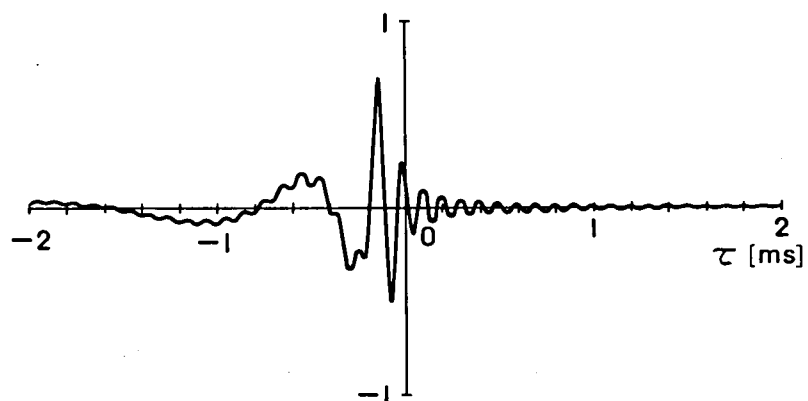
$$\tau(w) = \frac{\pi}{\log_e 2} \cdot \frac{1}{w} \quad (8.16)$$

となり群遅延特性は ω に逆比例することが分かる。すなわち、移相回路には周波数が高くなるにしたがって群遅延時間が小さくなるという特徴がある。

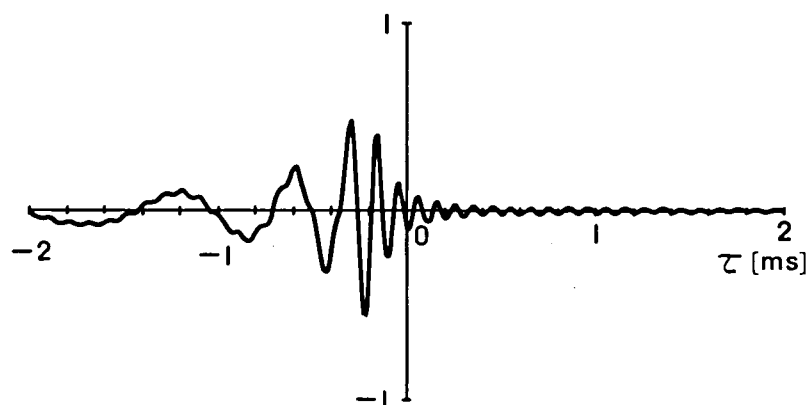
一般の音響信号のパワースペクトル密度関数はすべての周波数に対して一定でないの
でこの方式においても相関係数を0にすることは困難であるが、移相量を周波数の増加
とともに大きく変化させれば0に近づけることは可能であり、音像の拡がり感の得られ
ることが期待できる。

8.3.3 2チャンネル音響信号の相互相関関数

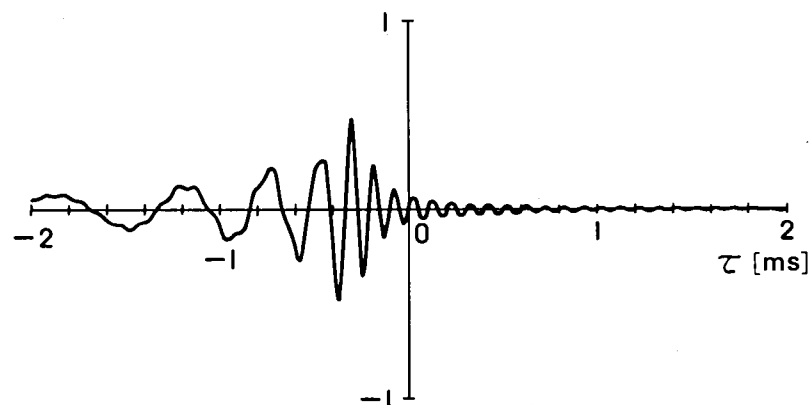
音像の拡がり感は相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど大きくなるので、
帯域分割方式および移相方式で得られる2チャンネル音響信号の相互相関関数について
検討する。これらの2方式によって得られる音響信号の相互相関関数を一般的に解くこ
とは困難なので計算機を用いて数値計算を行った。その結果、帯域分割方式では同位相
の帯域と逆位相の帯域を交互にしかも狭くすることによって、相互相関関数の絶対値の
最大値は0に近づくこと、また、相互相関関数の形は左右対称で音像の定位は偏らない
ことが分かった。次に、移相方式によって得られる音響信号の相互相関関数の一例を
Fig. 8.6 に示す。ただし、音響信号としては白色雑音を10 kHzの低域通過フィルタに
通して得られる低域雑音を仮定した。また、移相器の移相量を $\pi/0CT$ 、 $2\pi/0CT$ および
 $3\pi/0CT$ とした。Fig. 8.6 から相互相関関数は $\tau < 0$ にピークを持つが、移相量の変
化を大きくすればピークの値は小さくなることが分かった。なお、この場合の相互相関
関数の形は左右非対称で $\tau < 0$ の範囲にピークを持つので音像は正中面より左に偏る。
したがって、この定位のずれは右の音響信号のレベルを大きくすることによって補正す
る必要がある。



(a) π / OCT



(b) $2\pi / \text{OCT}$



(c) $3\pi / \text{OCT}$

Fig. 8.6 Cross-correlation functions of low-pass filtered noise through the phase shifter type quasi-stereophonic system.

8.4 心理実験

帯域分割式擬似ステレオ方式によって得られる音像の空間的印象を定量的に分析する目的で心理実験を行った。

8.4.1 音響信号

帯域分割式擬似ステレオ方式を実現するには多数個の帯域通過フィルタが必要であり、実現が困難である。そこで、音響信号には計算機 (PDP 11/34) を用い帯域分割式擬似ステレオ方式をシミュレートして合成した擬似白色雑音対および男性アナウンサの発声した「青い空」という音声を用いた。

(A) 擬似白色雑音対

白色雑音を位相のでたらめな非常に多くの周波数の重ね合わせと考え⁽⁹⁶⁾、計算機を用いて擬似白色雑音対を合成した。擬似白色雑音対の上限周波数は約 10 kHz で、1.7 Hz 間隔のスペクトル成分を持ち、各スペクトル成分の初期位相角はランダムである。擬似白色雑音対の相関係数は Fig. 8.7 に示すように同位相成分と逆位相成分の割合を変えることによって変化させた。たとえば相関係数を 0 とするためには、同位相成分と逆位相成分を交互に配置した。実験には高速フーリエ逆変換を用いて合成した 7 種 ($r = 1, 2/3, 1/3, 0, -1/3, -2/3$ および -1) の

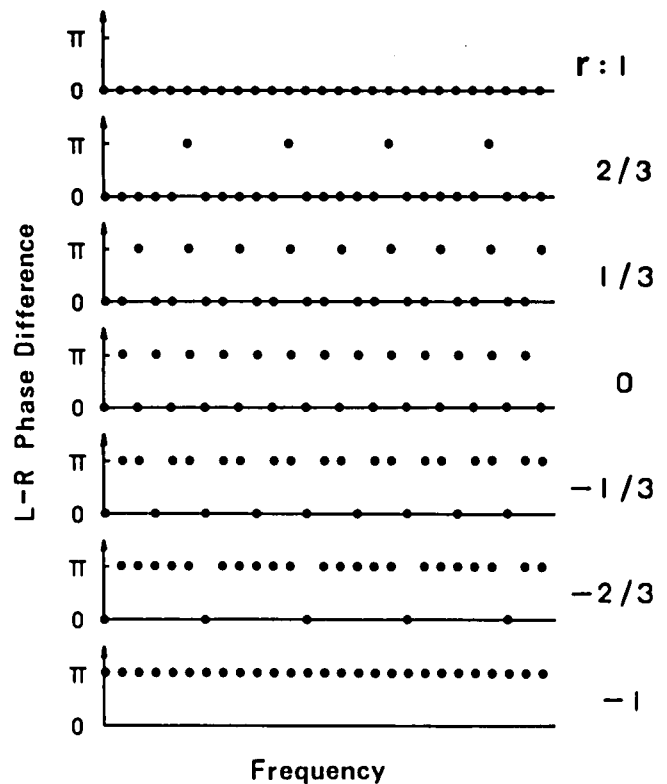


Fig. 8.7 Relationship between L-R phase difference of quasi-white noise spectrum and the cross-correlation coefficient.

擬似白色雑音対を用いた。雑音対の継続時間は1秒、立ち上がりおよび立ち下がり時間は50msとし、1秒間隔で相関係数の異なる2種類の雑音対を提示した。なお、雑音対の強さは約60dBSLで一定に保った。

(B) 音声「青い空」

男性アナウンサの発声した「青い空」という音声を高速フーリエ変換し、1.7 Hz間隔のスペクトルに分析した。次に、Fig. 8.8 に示すように同位相および逆位相の帯域を交互に配置し、これを高速フーリエ逆変換することによって相関係数の異なる7種の「青い空」という音声を合成した。ただし、Fig. 8.8 に示すように同位相と逆位相の帯域の境界部分には、境界にあたる周波数の変化が音色の変化として知覚されないようにスペクトル成分に傾斜を設けた。また、合成した音声の立ち上がりおよび立ち下がり部分に約40msの傾斜を付加し、クリック音の発生を除いた。なお、図中に示す相関係数

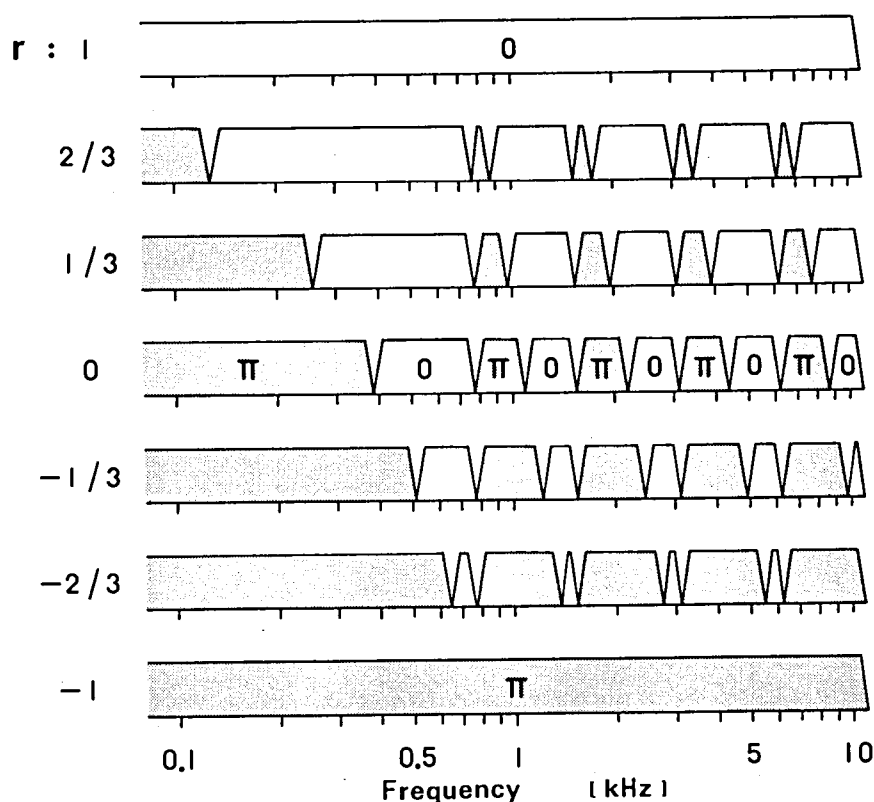


Fig. 8.8 Relationship between L-R phase difference of speech / ao i so ra / and the cross-correlation coefficient.

は、パワースペクトル密度関数を一定とした場合の理論値なので、実際の相関係数とは値が異なる。実験では1秒間隔で相関係数の異なる2種類の音声を約60dBSLで一定に保って提示した。

8.4.2 実験方法および分析方法

実験は無響室でFig. 6.1に示すスピーカ配置で行った。実験方法および分析方法は6.2節とまったく同様である。被験者は正常な両耳聴力を有する成人4名で、各被験者の判断はほぼ同じ傾向を示していたので、4名の判断の合計値を用いてKruskalのMDSで分析した。

8.4.3 実験結果

擬似白色雑音対および音声を音響信号に用いて得た結果をそれぞれFig. 8.9およびFig. 8.10に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で2次元知覚空間上に布置でき、音像の空間的印象を規定する2つの物理的要因はI軸およびII軸に対応してそれぞれ相関係数の絶対値および相関係数そのものであることが分かった。

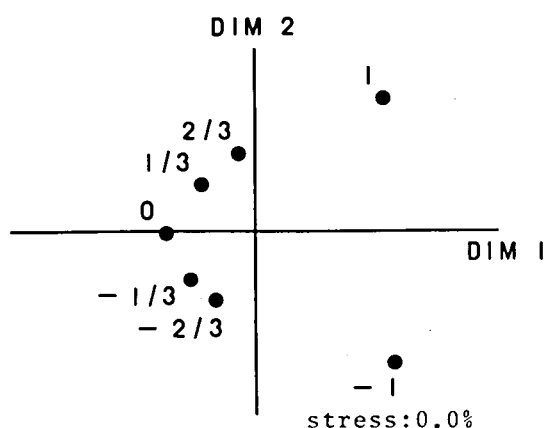


Fig. 8.9 Two-dimensional configuration of quasi-white noise with the various cross-correlation coefficients.

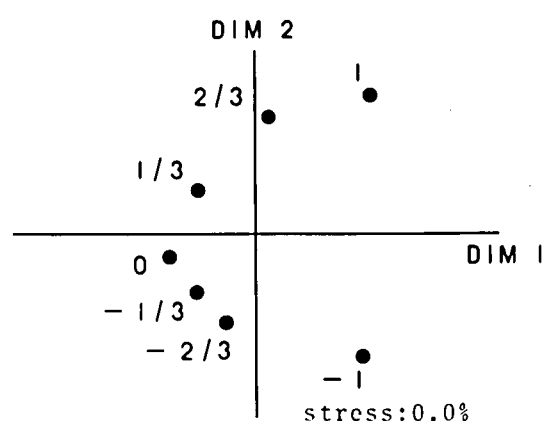


Fig. 8.10 Two-dimensional configuration of the speech / ao i so ra / with the various cross-correlation coefficients.

8.4.4 音像の空間的印象を規定する心理的要因

被験者は音像の空間的印象の差として音像の拡がり感および距離感を指摘したので一対比較によりどちらの音像がより

(A) 拡がっているか (拡がり感)

(B) 遠方に知覚されるか (距離感)

の判断をそれぞれ行った。被験者の判断はほぼ同じ傾向を示していたのでその合計値を用いて類似性マトリックスを作成し、それをKruskalのMDSで分析した。結果をFig. 8.11およびFig. 8.12に示す。いずれの場合も各音像はストレス0で1次元知覚空間上に布置でき、相関係数の絶対値が小さくなるほど音像はより拡がって知覚されること、相関係数が大きくなるほどより遠方に知覚されることが明らかになった。これらのことからFig. 8.9 およびFig. 8.10のI軸およびII軸に対応する心理的要因はそれぞれ音像の拡がり感と距離感であると解釈することができる。なお、この結果は音響信号に白色雑音対を用いて調べた結果と一致している。

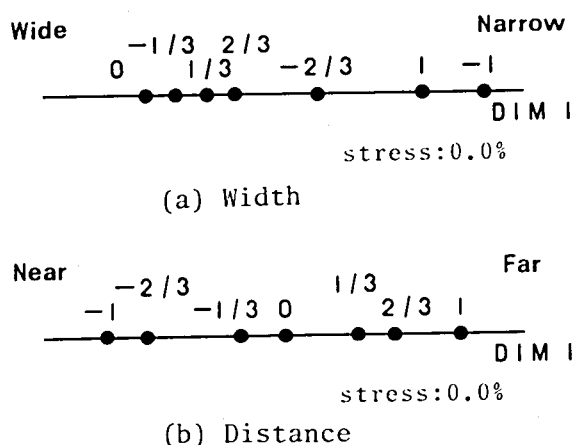


Fig. 8.11 One-dimensional configurations of quasi-white noise concerning (a) width and (b) distance, respectively.

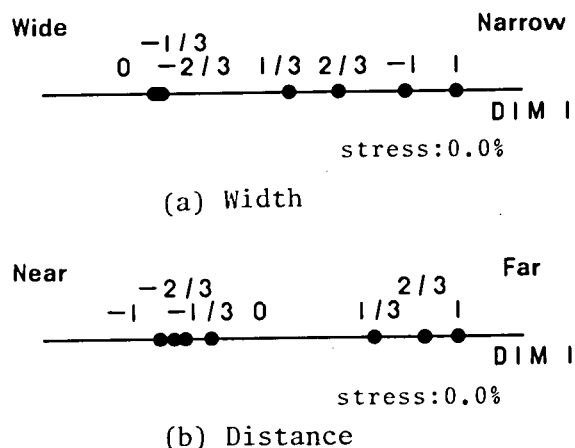


Fig. 8.12 One-dimensional configurations of the speech / aoi so ra / concerning (a) width and (b) distance, respectively.

8.4.5 音像の幅

相関係数の異なる擬似白色雑音対および音声の音像がどの程度まで拡がっているのかを明らかにする目的で以下の実験を行った。スピーカおよび目盛りを Fig. 8.13 に示すように配置し、被験者に音像の幅がどの範囲まで拡がっているのかを目盛りの数字で答えさせた。実験では上記2つの音響信号の他に相関係数の異なる白色雑音対も用いた。被験者による判断にはほとんど

差がなかったのでその平均値を求めた。Fig. 8.14 に結果を示す。いずれの場合も相関係数が0で音像の幅が最大となり、ほぼ2つのスピーカ間隔まで拡がっていることが分かる。すなわち、帯域分割式擬似ステレオ方式の有効性が明らかになった。

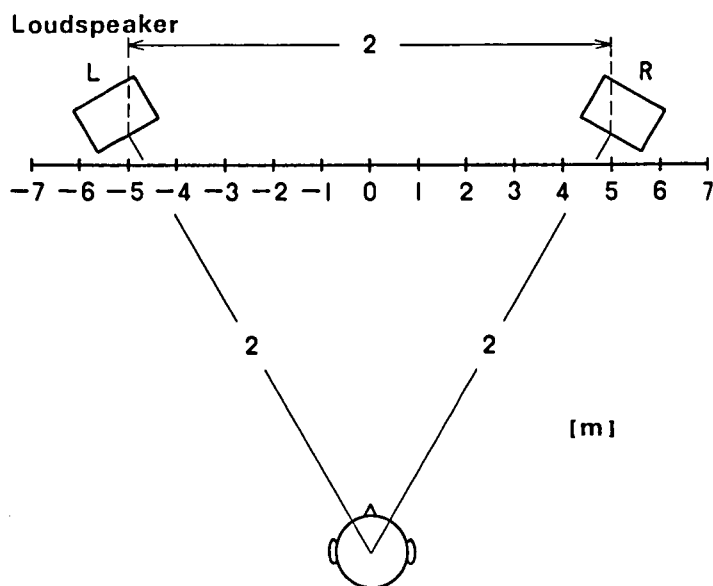


Fig. 8.13 Arrangement of loudspeakers.

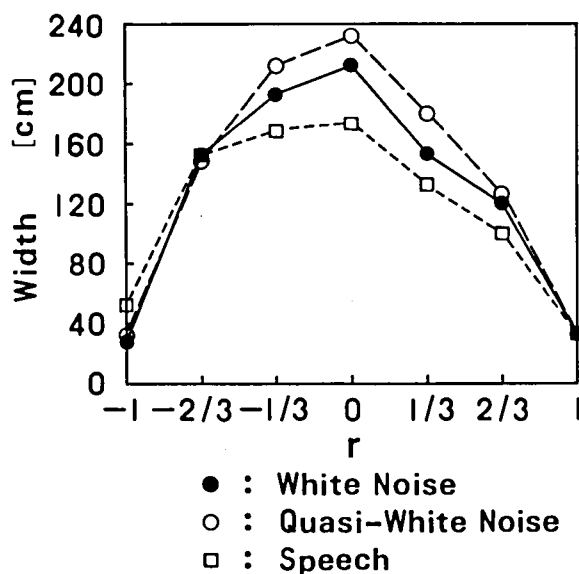


Fig. 8.14 The width of the sound image for acoustic signals with the various cross-correlation coefficients.

8.4.6 移相式擬似ステレオ方式

移相式擬似ステレオ方式による心理実験は行われなかったが、昭和57年度NHK技研および基礎研公開において本方式のデモンストレーションを行い、見学者からその有効性が認められた。また、NHK・FM放送においても効果音作成装置として多くの番組制作に使用した。

8.5 結言

従来の擬似ステレオ方式を概観したのち、新しい擬似ステレオ方式として帯域分割式および移相式の2つの方式を提案した。これらの方式はいずれも「2チャンネル音響信号の相関係数が0（かつ独立）であれば音像の拡がり感は最大となる」という知見に基づいている。帯域分割式擬似ステレオ方式を計算機を用いてシミュレートし、心理実験を行った。その結果、音像の空間的印象が心理的には主として音像の拡がり感と距離感によって規定されること、物理的にはそれぞれ相関係数の絶対値および相関係数そのものに対応することが分かった。さらに、相関係数が0のとき、音像はほぼスピーカ間隔まで拡がって知覚され、擬似ステレオ方式として有効であることを明らかにした。

移相式擬似ステレオ方式は回路構成が比較的簡単なので実際にFM放送などで使用しているが、帯域分割式擬似ステレオ方式は多数個のフィルタを必要とするのでその実現化は多少困難である。しかし、その有効性は心理実験により明らかであり、小型・軽量のフィルタが開発されれば実現化できるであろう。

第9章 相関係数変化法による音像の距離感制御方式⁽⁹⁷⁾

9.1 概観

一般的に、音像の距離感を制御することは困難で、ごく限られた範囲でしか実現されていない。そこで、「相関係数を1から-1まで連続的に変化させれば音像は遠方から頭のごく近くにまで接近する」という知見を利用した音像の距離感制御方式を3種類提案する。その1つである90°移相回路方式を用いて心理実験を行い、音像の拡がり感をほぼ一定に保ったままで音像の距離感の制御が可能であることを示す。ただし、この方式では音像の定位が水平面内で左右に偏るので定位補正用の音量減衰器を必要とする。そこで、この補正を自動的に行う方式として α° 移相回路方式を提案し、 α° が約70°のとき音像がほぼ直線的に接近することを示す。次に、回路構成のより簡単な遅延回路方式を提案し、音像の距離感制御方式として有効であることを明らかにする。

9.2 従来の音像の距離感制御方式

Heegaard⁽⁵¹⁾は無響室内で録音したピストル音をまず左右同位相で提示し、続いて遅延信号を2回いずれも左右逆位相で提示すれば、音像が聴取者の前方から後頭部付近まで飛んで近づいてくると述べている。この方式は、NHK・FMステレオドラマ「鉄の伝説」などでレベルを次第に大きくする方式と併用して使用され番組効果を高めている⁽⁹⁸⁾。

一方、後藤ら⁽³¹⁾は頭部伝達関数をシミュレートすることによって、まず、頭内に定位する音像を作り、この音像と頭外に定位する音像とを融合させれば、スピーカと聴取者間の任意の距離に音像を定位できると報告している。

このように音像の距離感を制御する方式はいくつか提案されてはいるが、さらにより簡単な操作で連続的に音像の距離感を制御する方式を検討する余地は残されている。

9.3 音像の距離感制御法Ⅰ(90°移相回路方式)

2チャンネル音響信号の相関係数 r を1から-1まで連続的に変化させれば、音像は遠方から聴取者の頭内または後頭部付近まで接近する。しかし、この場合 $r=0$ でかつ両チャンネルの音響信号が独立であれば音像が拡がって知覚されるので自然な接近感

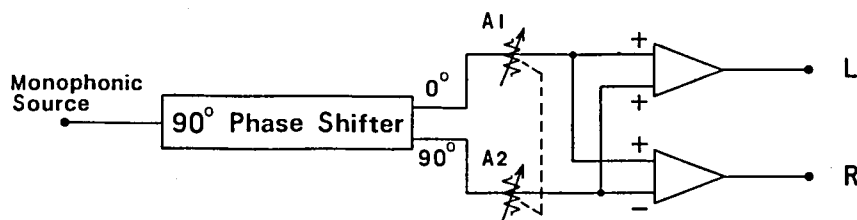


Fig. 9.1 A control method of sound image distance (90° phase shifter type).

得られない。そこで、予備実験において両チャンネルの音響信号の相関係数を、全帯域にわたって一定の位相差を持たせること（すなわち、両チャンネルの音響信号を独立でなくする）によって変化させたところ、 $r = 0$ においても音像があまり拡がらないことが分かった。全帯域にわたって一

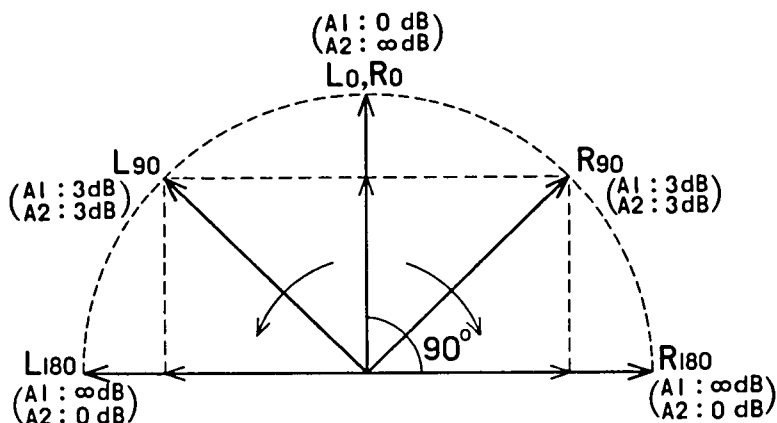


Fig. 9.2 Vector diagram.

定の位相差を持つ音響信号は Fig. 9.1 に示すような方式で合成することができる。すなわち、単一の音響信号を 90° 移相回路によって全帯域にわたって 90° 位相の異なる2つの音響信号に分岐する。この2つの音響信号を逆連動型音量減衰器A1およびA2により減衰させ、位相の基準となる音響信号を左右同（あるいは逆）位相で、 90° 位相の進んだ音響信号を左右逆（あるいは同）位相で合成して2チャンネル音響信号とする。この方式によって得られる左右の音響信号の位相差（ $\Delta\theta$ ）は Fig. 9.2 に示すように、A1の減衰量が0dBでA2の減衰量が無限大の場合には 0° 、A1とA2の減衰量がともに3dBの場合には 90° 、A1の減衰量が無限大でA2の減衰量が0dBの場合には 180° となる。また、左および右の音響信号を示すベクトルが円を描くようにA1とA2の減衰量を定めることができるので、出力レベルを一定に保つことができる。すなわち、Fig. 9.1 の方式により出力レベルを一定に保ったまま $\Delta\theta$ を 0° から 180° まで連続的に変えることができる。なお、 $\Delta\theta$ は周波数に依存せず、全帯域にわたって一定である。

音像の拡がり感は相互相関関数の絶対値の最大値によって規定されるので、ここで、この方式で得られる左右の音響信号の相互相関関数 $r(\tau)$ を求める。なお、音響信号は 0 から B (Hz) までの周波数成分からなる低域雑音対であると仮定する。ただし、 B を約 20 kHz 以上と仮定すれば聴覚的には白色雑音対とみなすことができる。

$L(t)$ および $R(t)$ の周波数 f における成分をそれぞれ $n_f(t)$ および $m_f(t)$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} L(t) &= \int_0^B n_f(t) df \\ R(t) &= \int_0^B m_f(t) df \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

が成り立つ。また、 $n_f(t)$ および $m_f(t)$ は

$$\left. \begin{aligned} n_f(t) &= a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_f) \\ m_f(t) &= a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_f - \Delta\theta) \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

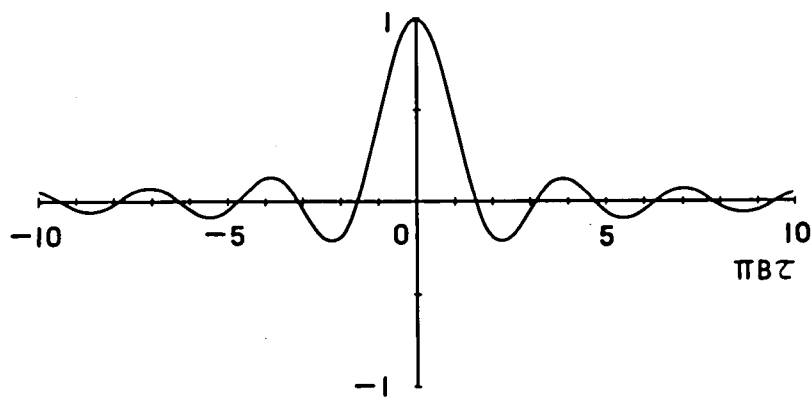
と表すことができる。ここに $a_f(t)$ (≥ 0) は周波数 f における雑音の振幅であり、 θ_f は周波数 f の成分に対する初期位相角、 $\Delta\theta$ は左右の音響信号の位相差である。(9.1), (9.2) 式を (2.1) 式に代入することにより

$$r(\tau) = \frac{\sin(\pi B \tau)}{\pi B \tau} \cdot \cos(\pi B \tau + \Delta\theta) \quad (9.3)$$

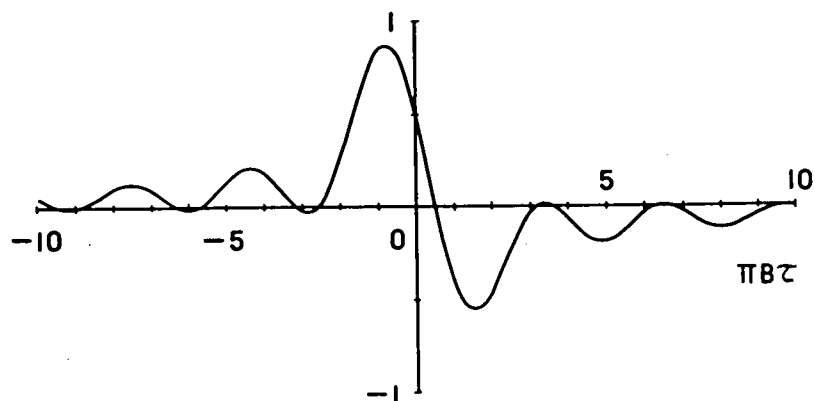
が得られる (付録 2 参照)。

Fig. 9.3 に全帯域にわたって一定の位相差を持つ低域雑音対の相互相関関数を示す。Fig. 9.3 は位相差 ($\Delta\theta$) が 0° から 180° まで連続的に変化すれば相関係数が 1 から -1 まで連続的に変化すること、相互相関関数の絶対値の最大値は $\Delta\theta = 0^\circ$ および 180° の場合に最大となり、 $\Delta\theta = 90^\circ$ の場合に最小となることを示している。

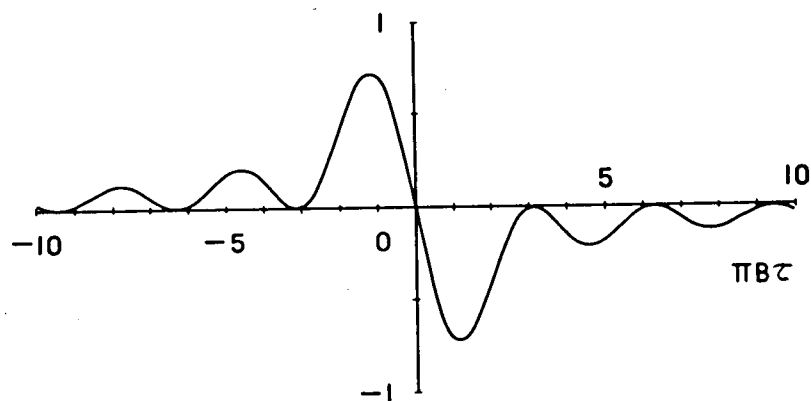
なお、Fig. 2.1 に示す方法で合成した低域雑音対の相互相関関数は $\tau = 0$ にピークを持つので Fig. 9.1 に示す方法で合成した低域雑音対の相互相関関数とは形が異なっている。



(a) $\Delta\theta = 0^\circ$



(b) $\Delta\theta = 60^\circ$



(c) $\Delta\theta = 90^\circ$

Fig. 9.3 (a to c) Cross-correlation functions of low-pass filtered noises having a constant phase difference.

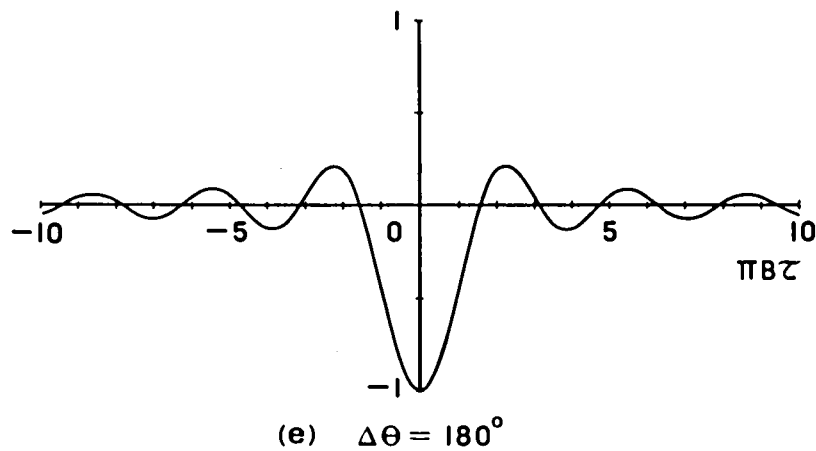
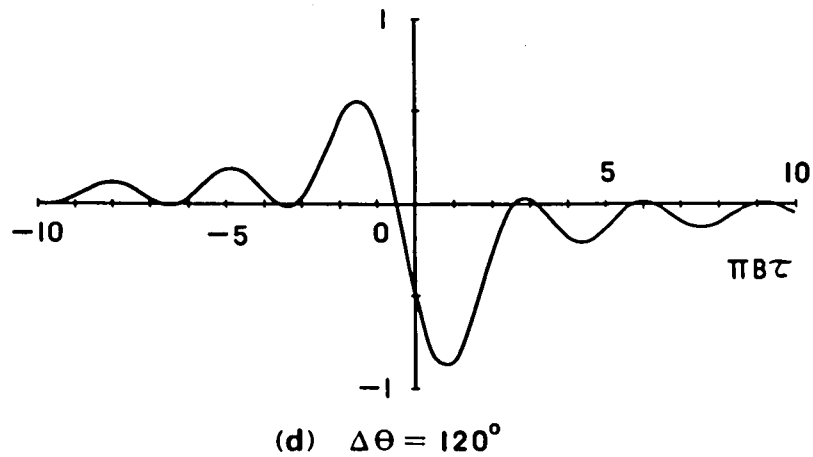


Fig. 9.3 (d to e) Cross-correlation functions of low-pass filtered noises having a constant phase difference.

9.4 心理実験

9.4.1 音響信号

実験は次の2条件で行った。条件Ⅰでは音響信号にFig. 9.1に示す方式で合成した全帯域にわたって一定の位相差を持つ7種類の白色雑音対 ($\Delta\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ および 180°) を用いた。条件Ⅱでは音響信号にFig. 9.1に示す方式で合成した3種類の白色雑音対 ($\Delta\theta = 45^\circ, 90^\circ$ および 135°) とFig. 2.1に示す方法で合成した相関係数の異なる5種類の白色雑音対 ($r = 1, 2/3, 0, -2/3$ および -1) を用いた。すでに述べたように、白色雑音対の相互相関関数は合成方法に

よって異なる。したがって、相互相関関数の異なる白色雑音対を区別する目的で、全帯域にわたって一定の位相差を持つ白色雑音対は位相差 $\Delta\theta$ を用いて表し、相関係数の異なる白色雑音対は相関係数 r を用いて表した。なお、ここで示す位相差 $\Delta\theta$ および相関係数 r は2チャンネル音響信号のスピーカ入力における位相差および相関係数である。

いずれの場合も白色雑音対の継続時間は1秒、立ち上がりおよび立ち下がり時間は50msとし、1秒間隔で相互相関関数の異なる2種類の雑音対を提示した。また、雑音対の強さは約60dBSLで一定に保った。

9.4.2 実験方法および分析方法

実験は無響室でFig. 6.1に示すスピーカ配置で行った。実験方法および分析方法は6.2節とまったく同様である。ただし、被験者は正常な両耳聴力を有する成人4名で、相互相関関数の異なる7種および8種の白色雑音対のすべての組み合わせ（42通りおよび56通り）について一対比較を行った。

4名の被験者の判断はほぼ同じ傾向を示していたので、4名の判断の合計値を用いてKruskalのMDSで分析した。

9.4.3 実験結果

条件IおよびIIの分析結果をそれぞれFig. 9.4およびFig. 9.5に示す。図中の添字はその音響信号の位相差 $\Delta\theta$ または2台の独立な雑音発生器を用いて合成した白色雑音対の相関係数 r である。

条件Iでは各音像はストレス0で2次元知覚空間上に布置でき、音像の空間的印象を規定する物理的要因はI軸およびII軸に対応してそれぞれ相互相関関数の絶対値の最大値および左右の音響信号の位相差すなわち相関係数そのものであることが分

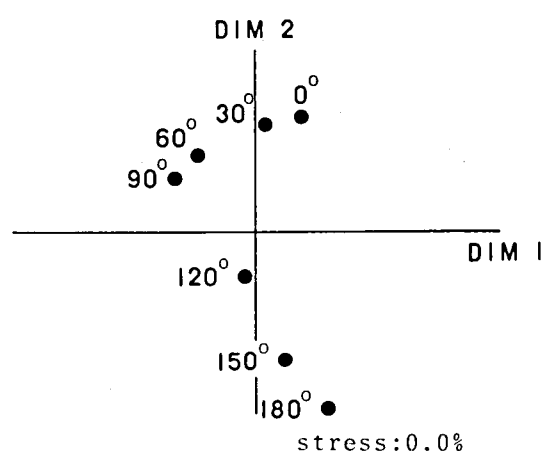


Fig. 9.4 Two-dimensional configuration of white noise with the various phase differences.

かる。

条件Ⅱでは各音像はストレス0で3次元知覚空間上に布置でき、Ⅰ軸およびⅡ軸に対応する物理的要因の解釈はFig. 9.4と同じであること、また、Ⅲ軸はほぼ相互相関関数の $r = 0$ の軸に関する非対称性に対応することが分かった。

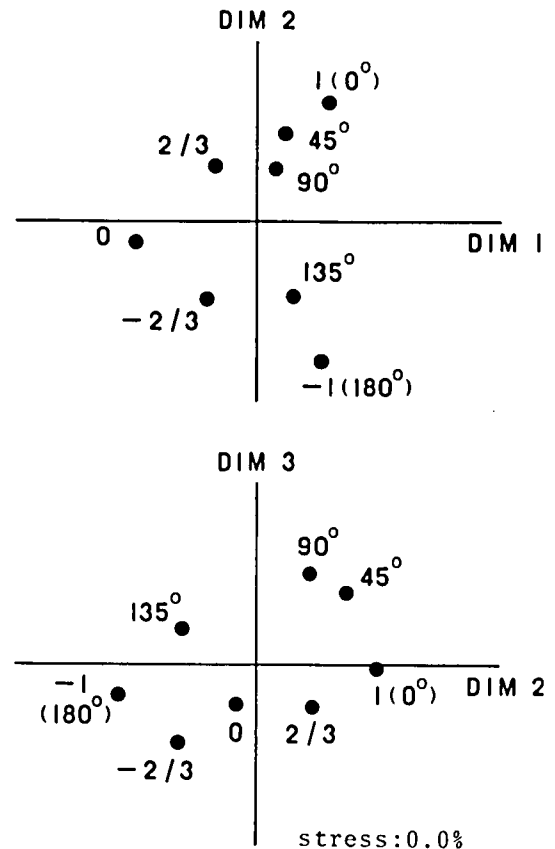


Fig. 9.5 Three-dimensional configuration of white noise with the various cross-correlation functions.

9.4.4 音像の空間的印象を規定する心理的要因

第6章で明らかにしている結果から、Fig. 9.5のⅠ軸およびⅡ軸に対応する心理的要因はそれぞれ音像の拡がり感および距離感であると考えることができる。また、Ⅲ軸方向では $r = \pm 1$ 、 $\pm 2/3$ および 0 の音像の差は小さく、 $\Delta\theta = 90^\circ$ の音像が最も偏っていることから、Ⅲ軸は水平面内の定位方向に対応すると推定できる。なお、これらの心理的要因と各軸とが対応することは簡単な聴取実験によって確認した。すなわち、相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど音像の拡がり感の大きくなること、相関係数そのものが大きくなるほど音像が遠方に定位すること、相互相関関数の形が左右非対称な場合には音像の定位が水平面内で偏ることが明らかになった。なお、音像の拡が

り感および左右方向感に関する結果はヘッドホン受聴時における結果と同じである。

また、Fig. 9.4 と Fig. 9.5 を比較することにより Fig. 9.4 の I 軸は音像の拡がり感または左右方向感に、II 軸は音像の距離感にそれぞれ対応することが分かる。

以上の結果は全帯域にわたって一定の位相差を持つ白色雑音対の音像は拡がり感にほとんど差がなく、距離感に大きな差のあることを示している。すなわち、Fig. 9.1 に示す音像の距離感制御方式が有効であることを裏付けている。ただし、この方式を用いて音像を遠方 ($\Delta\theta = 0^\circ$) から近傍 ($\Delta\theta = 180^\circ$) まで連続的に接近させると水平面内の定位が位相の進んでいる音響信号を提示したスピーカ方向 (Fig. 9.1 の方法では L 側) に偏るので、音像を直線的に接近させる場合には左右の音響信号のレベル差による補正を行う必要がある。この方式は昭和57年度 N H K 技研および基礎研公開においてデモンストレーションを行ったほか、N H K ・ F M 放送においても効果音作成装置として多くの番組に使用し、音像の拡がり感を変化させることなく距離感の制御が可能であることを示した。

9.5 音像の距離感制御法Ⅱ (α° 移相回路方式)

90° 移相回路方式によって音像の距離感の制御を行う場合、音像を直線的に接近させるには左右の音響信号のレベル差による定位補正が必要である。しかもこの補正は左右の音響信号の位相差 $\Delta\theta$ に連動して行う必要があり、操作が繁雑となる。そこで、この欠点を補う方式として α° 移相回路方式の距離感制御法を提案する。Fig. 9.6 に系統図を示す。この方式は基本的には 90° 移相回路方式と等しいが、 90° 移相回路のかわりに α° 移相回路を用いている。単一の音響信号を α° 移相回路によって全帯域にわたっ

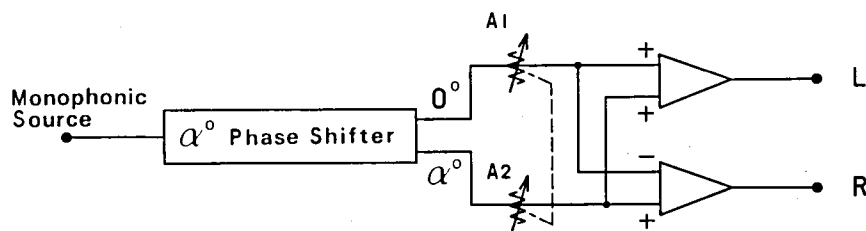


Fig. 9.6 A control method of sound image distance (α° phase shifter type).

て α° 位相の異なる2つの音響信号に分歧する。この2つの音響信号を逆連動型音量減衰器A1およびA2によって減衰したのち、位相の基準となる音響信号を左右逆位相で、 α° 位相の進んだ音響信号を左右同位相で合成し、2チャンネル音響信号とする。

Fig. 9.7 に示すように、この方式によってもA1およびA2の減衰量を変えることによって左右の音響信号の位相差 $\Delta\theta$ は 0° から 180° まで変化するが、この方式には位相差に伴って左右の音響信号にレベル差を生じるという特徴がある。

簡単な聴取実験から、 $\Delta\theta$ が 90° の場合の音像の定位の偏りは、位相の進んでいる音響信号のレベルを約3 dB下げれば補正できることが明らかになった。そこで、 $\Delta\theta$ が 90° の場合に位相の進んでいる音響信号のレベルが約3 dB小さくなるような α° 移相回路の α° を求めた。その結果、 α° が約 70° のとき位相の進んでいる音響信号のレベルが約3 dB小さくなることが分かった（付録3参照）。

したがって、 70° 移相回路を用いて距離感制御装置を構成した場合に、A1およびA2を操作することにより音像が直線的に接近することが期待でき、このことは簡単な聴取実験により確認

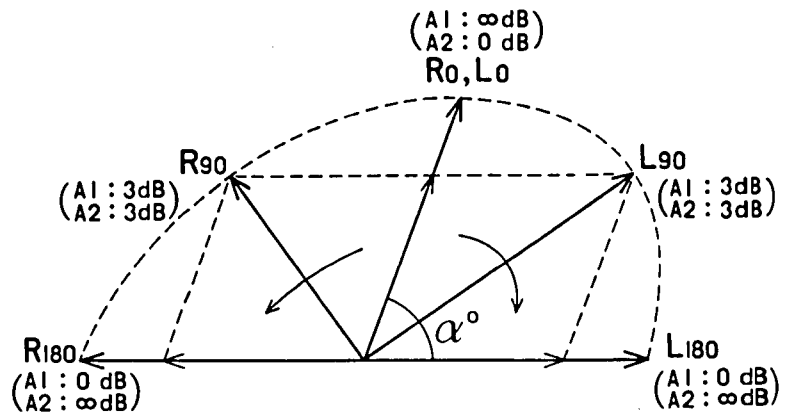


Fig. 9.7 Vector diagram.

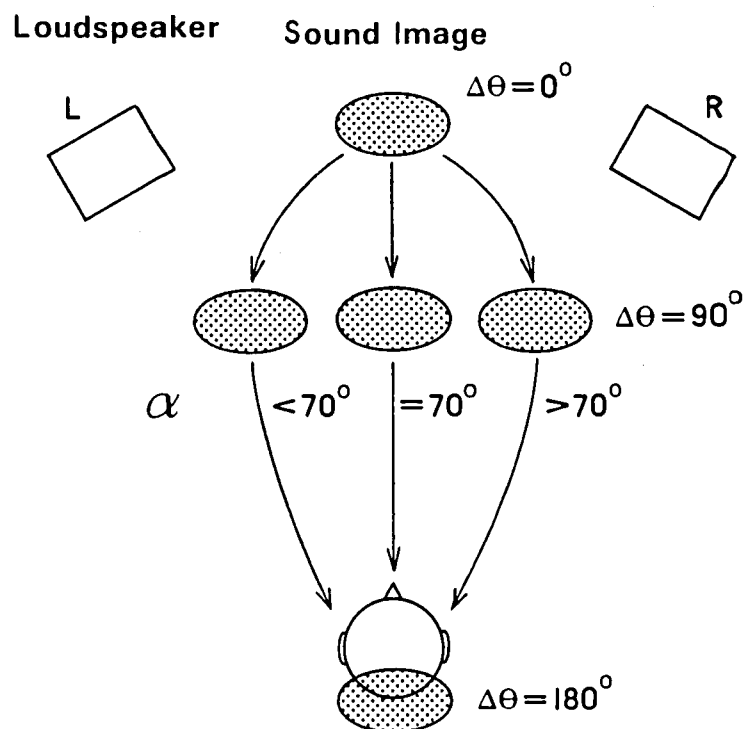


Fig. 9.8 Loci of sound image.

できた。また、 α° 移相回路の α° を変えることにより、音像は Fig. 9.8 に示すように種々の軌跡を描いて接近することが分かった。

9.6 音像の距離感制御法Ⅲ（遅延回路方式）

すでに述べたように、 90° 移相回路方式または α° 移相回路方式によって音像の距離感の制御ができる。しかし、いずれの方式にせよ移相回路を用いる必要があり、回路構成が多少繁雑となる。そこで Fig. 9.9 に示す遅延回路方式を提案する。この方式では単に遅延時間の短い遅延回路を用いるだけなので回路構成は比較的簡単である。この方式も基本的には相関係数を 1 から -1 まで連続的に変化させて音像の距離感を制御する方式である。

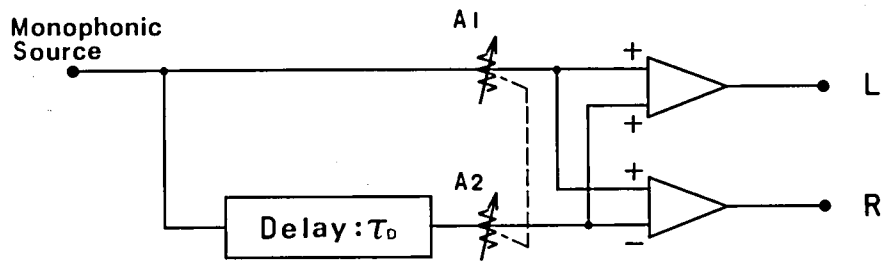


Fig. 9.9 A control method of sound image distance (delay line type).

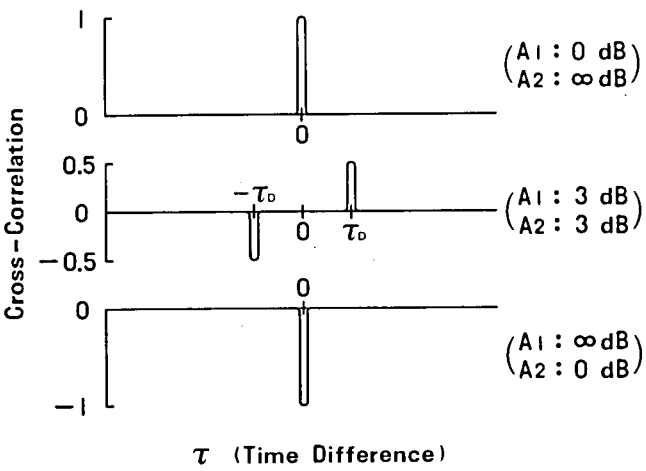


Fig. 9.10 Cross-correlation functions of two-channel acoustic signals through the delay line type control method of sound image distance.

単一の音響信号を2分岐し，一方に遅延回路を挿入する。次に，原音響信号と遅延信号をそれぞれ逆連動型音量減衰器A1およびA2により減衰し，原音響信号を左右同（あるいは逆）位相で，遅延信号を左右逆（あるいは同）位相で合成して2チャンネル音響信号とする。説明を単純にするために原音響信号を白色雑音と仮定すれば，左右の音響信号の相互相関関数はFig. 9.10に示すようになる（付録4参照）。Fig. 9.10はA1の減衰量が0 dBでA2の減衰量が無限大の場合には相関係数は1，A1とA2の減衰量がともに等しく3 dBの場合には相関係数は0，A1の減衰量が無限大でA2の減衰量が0 dBの場合には相関係数は-1となることを示している。相関係数が1および-1の場合に音像が拡がらないことはすでに述べた通りである。また，相関係数が0の場合においても5.4節に示したように遅延回路の遅延時間を小さくすれば，音像の拡がり感を小さく保つことができると思われる。そこで，遅延時間を300 μ sとして簡単な聴取実験を行った。その結果，音像の拡がり感の変化はほとんどなく，音像はほぼ直線的に接近してくることが分かった。

9.7 結言

一般的に音像の距離感を制御することは困難で，これまでごく限られた範囲でしかその制御は実現されていなかった。そこで，「相関係数を1から-1まで連続的に変化させれば音像は遠方から頭のごく近くにまで接近する」という知見を利用した距離感制御方式を提案した。その1つである90°移相回路方式で，音像は拡がり感の変化をほとんど伴わないで遠方から頭のごく近くにまで接近できることを心理実験により示した。しかし，この方式では音像の定位が水平面内で偏るので，音像を直線的に接近させる場合には定位方向を左右の音響信号にレベル差を与えることにより補正する必要がある。そこで，この欠点を改良した α° 移相回路方式を提案し α° を70°とすれば音像をほぼ直線的に接近できることを示した。さらに回路構成のより簡単な遅延回路方式を提案し，その有効性を明らかにした。

第10章 結論

2チャンネル音響信号をヘッドホン受聴またはスピーカ再生した場合に生ずる音像の空間的印象がどのような物理的要因および心理的要因によって規定されるのかを明らかにした。

スピーカ再生においては2チャンネル音響信号のレベル差および時間差（または位相差）を変えることによって音像の水平面内の定位方向が制御できることはよく知られているので、本研究では、2チャンネル音響信号の相互相関関数または相関係数と音像の空間的印象の対応関係を明らかにした。さらに音像の空間的印象の制御方法を新しく提案した。

本研究により得られた主な結論を列挙すると以下のようになる。

第2章では、2チャンネル音響信号の相互相関関数および相関係数について述べた。

第3章および第4章では、2チャンネル音響信号の相関係数または相互相関関数とヘッドホン受聴時における音像の空間的印象の対応関係について述べ、音像の空間的印象は主として音像の拡がり感、上下方向感および左右方向感によって規定されること、音像の拡がり感は相互相関関数の絶対値の最大値が小さくなるほど、また、ピークの位置が $\tau = 0$ より離れるほど大きくなること、音像の上下方向感は相互相関関数のピークが正の範囲においてはピークの値が小さくなるほど、また、その位置が $\tau = 0$ より離れるほど下方に定位する傾向のあること、音像の左右方向感に対応する物理的要因は相互相関関数の左右非対称性であり主として正のピークの位置が音像の左右方向感を規定することなどを明らかにした。

第5章では、相互相関関数の異なる種々の音響信号によって生じる音像の拡がり感を相関係数の異なる白色雑音対の音像の拡がり感を基準として定量的に示した。

第6章では、2チャンネル音響信号の相関係数と2チャンネルスピーカ再生時における音像の空間的印象の対応関係を明らかにし、音像の空間的印象は主として音像の拡がり感と距離感によって規定されること、音像の拡がり感は相関係数の絶対値の最大値が小さくなるほど大きくなること、音像の距離感は相関係数そのものによって規定され $r = -1$ で最小となることなどを明らかにした。

第7章では、マスキング量が空間的に変化することを利用して音像の空間的印象を定量的に示した。

第8章では、第3章から第6章までに得られた結果を利用して、音像の拡がり感を制御する方式を新しく提案し、心理実験によりその有効性を示した。

第9章では，第6章で得られた結果を利用して，音像の距離感を制御する方式を新しく提案し，心理実験によりその有効性を示した。

謝 辞

本論文をまとめるにあたって、懇切な御指導と便宜を賜わった京都大学川端 昭教授，山本剛夫教授ならびに木嶋 昭教授に心から感謝の意を表する。

本研究は，NHK放送科学基礎研究所視聴科学研究部および放送技術研究所音響聴覚研究部において昭和53年から昭和60年の間に実施したものである。

研究の初期より終始御指導いただき，適切な御助言をいただいた大串健吾音響聴覚研究部副部長に深甚なる謝意を表する。

また，本研究の機会を与えて下さり，有益な御助言をいただいた藤尾孝放送技術研究所前所長，坂田晴夫放送技術研究所前研究主幹（現クラリオン㈱技術本部長），二階堂誠也視聴科学研究部前部長（現制作技術局番組技術センター第3班部長），日下秀夫視覚情報研究部部長に謝意を表する。

さらに，本論文の作成に際し，暖かい励ましをいただいた氏原淳一放送技術研究所次長に感謝の意を表する。

本研究の遂行にあたり，終始熱心な御討論をいただいた桑原尚夫音響聴覚研究部主任研究員，宮坂栄一音響聴覚研究部研究員に深く感謝する。また，本研究に種々の便宜を与えて下さった山本照二技術本部チーフ・エンジニアおよび中林克巳技術本部副部長，辻本廉制作技術局番組技術センター第3班チーフ・エンジニア，西隆司音響聴覚研究部研究員の方々に深く感謝する。

昭和61年10月

参考文献

- (1) 国井郷志, “PCM録音アダプタの標準化,” 音響学会誌 35, 704-708 (1979).
- (2) 境 久雄編著, 聴覚と音響心理, (コロナ社, 東京; 1978), p. 75 .
- (3) Wallach, H., Newman, E. B. and Rosenzweig, M. R., “The precedence effect in sound localization,” Am. J. Psychol. 62, 315-336 (1949).
- (4) Haas, H., “Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache,” Acustica 1, 49-58 (1951).
- (5) Sandel, T. T., Teas, D. C., Feddersen, W. E., and Jeffress, L. A., “Localization of sound from single and paired sources,” J. Acoust. Soc. Am. 27, 842-852 (1955).
- (6) Leakey, D. M. and Cherry, E. C., “Influence of noise upon the equivalence of intensity differences and small time delays in two-loudspeaker systems,” J. Acoust. Soc. Am. 29, 284-286 (1957).
- (7) Clark, H. A. M., Dutton, G. F., and Vanderlyn, P. B., “The “Stereosonic” recording and reproducing system,” IRE Trans. Audio AU 5, 96-111 (1957).
- (8) Mills, A. W., “On the minimum audible angle,” J. Acoust. Soc. Am. 30, 237-246 (1958).
- (9) Olson, H. F., “Stereophonic sound reproduction in the home,” J. Audio Eng. Soc. 6, 80-90 (1958).
- (10) Leakey, D. M., “Some measurements of the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound systems,” J. Acoust. Soc. Am. 31, 977-986 (1959).
- (11) Bauer, B. B., “Phasor analysis of some stereophonic phenomena,” J. Acoust. Soc. Am. 33, 1536-1539 (1961).
- (12) Makita, Y., “On the directional localisation of sound in the stereophonic sound field.” Europ. Broadcasting Union Review, Part A - Technical 73, 102-108 (1962).
- (13) Mertens, H., “Directional hearing in stereophony - Theory and experimental verification,” Europ. Broadcasting Union Review, Part-A, 92, 146-158 (1965).

- (14) Gardner, M. B., "Historical background of the Haas and/or precedence effect," J. Acoust. Soc. Am. 43, 1243-1248 (1968).
- (15) Damaske, P. and Mellert, V., "Ein Verfahren zur richtungstreu Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher," Acustica 22, 153-162 (1969/70).
- (16) Damaske, P., "Head - related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction," J. Acoust. Soc. Am. 50, 1109-1115 (1971).
- (17) Damaske, P. and Mellert, V., "Zur richtungstreu stereophonen Zweikanalübertragung," Acustica 24, 222-225 (1971).
- (18) Kohsaka, O., Satoh, E., and Nakayama, T., "Sound-image localization in multichannel matrix reproduction," J. Audio Eng. Soc. 20, 542-548 (1972).
- (19) Haas, H., "The influence of a single echo on the audibility of speech," J. Audio Eng. Soc. 20, 146-159 (1972).
- (20) Gardner, M. B., "Some single - and multiple-source localization effects," J. Audio Eng. Soc. 21, 430-437 (1973).
- (21) Matsudaira, T. K. and Fukami, T., "Phase difference and sound image localization," J. Audio Eng. Soc. 21, 792-797 (1973).
- (22) 中林克巳, "水平面内における方向定位," 音響学会誌 30, 151-160 (1974).
- (23) Scharf, B., "Localization of unlike tones from two loudspeakers," In Sensation and measurement, Moskowitz, H. R. et al. Eds., (Reidel, Dordrecht, 1974), p. 309-314.
- (24) Shaw, E. A. G., "Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane," J. Acoust. Soc. Am. 56, 1848-1861 (1974).
- (25) Ratliff, P. A., "Properties of hearing related to quadraphonic reproduction," BBC Research Department Report No.1974/38, (1974).
- (26) Bower, J. S., "The subjective effects of interchannel phase-shifts on the stereophonic image localisation of wideband audio signals," BBC Research Department Report No.1975/27, (1975).
- (27) Bower, J. S., "The subjective effects of interchannel phase-shifts on the stereophonic image localisation of narrowband audio signals,"

- B B C Research Department Report No.1975/28, (1975).
- (28) 中林克巳, “ステレオ音場の解析法とその応用,” 音響学会誌 33, 116-127 (1977).
- (29) 米沢義道, 伊東一典, “音源定位効果の画像認識への応用－表示平面の検討－,” 通信学会論文誌 C J60-C, 587-594 (1977).
- (30) Theile, G. and Plenge, G., “Localization of lateral phantom sources,” J. Audio Eng. Soc. 25, 196-200 (1977).
- (31) 後藤敏幸, 木村陽一, 山田明寿, 渡辺公治, “ステレオ再生における新音像定位制御方式,” 電気音響研資, EA80-70 (1981).
- (32) Sakamoto, N., Gotoh, T., Kogure, T., Shimbo, M., and Clegg, A. H., “Controlling sound-image localization in stereophonic reproduction,” J. Audio Eng. Soc. 29, 794-799 (1981).
- (33) Sakamoto, N., Gotoh, T., Kogure, T., Shimbo, M., and Clegg, A. H., “Controlling sound-image localization in stereophonic reproduction : Part II,” J. Audio Eng. Soc. 30, 719-722 (1982).
- (34) Gotoh, T., Kimura, Y., Yamada, A., and Watanabe, K., “A new sound image localization control system for stereophonic recording,” J. Acoust. Soc. Jpn.(E) 5, 85-94 (1984).
- (35) Wallach, H., “On sound localization,” J. Acoust. Soc. Am. 10, 270-274 (1939).
- (36) Roffler, S. K. and Butler, R. A., “Factors that influence the localization of sound in the vertical plane,” J. Acoust. Soc. Am. 43, 1255-1259 (1968).
- (37) Roffler, S. K. and Butler, R. A., “Localization of tonal stimuli in the vertical plane,” J. Acoust. Soc. Am. 43, 1260-1266 (1968).
- (38) Butler, R. A., “On the relative usefulness of monaural and binaural cues in locating sound in space,” Psychon. Sci. 17, 245-246 (1969).
- (39) Blauert, J., “Sound localization in the median plane,” Acustica 22, 205-213 (1969/70).
- (40) Gardner, M. B. and Gardner, R. S., “Problem of localization in the median plane : effect of pinnae cavity occlusion,” J. Acoust. Soc. Am. 53, 400-408 (1973).

- (41) Gardner, M. B., "Some monaural and binaural facets of median plane localization," J. Acoust. Soc. Am. 54, 1489-1495 (1973).
- (42) Hebrank, J. and Wright, D., "Are two ears necessary for localization of sound sources on the median plane ? ," J. Acoust. Soc. Am. 56, 935-938 (1974).
- (43) Hebrank, J. and Wright, D., "Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane," J. Acoust. Soc. Am. 56, 1829-1834 (1974).
- (44) Searle, C. L., Braida, L. D., Cuddy, D. R., and Davis, M. F., "Binaural pinna disparity : another auditory localization cue," J. Acoust. Soc. Am. 57, 448-455 (1975).
- (45) Hebrank, J. H., "Pinna disparity processing : A case of mistaken identity ? ," J. Acoust. Soc. Am. 59, 220-221 (1976).
- (46) Butler, R. A. and Belendiuk, K., "Spectral cues utilized in the localization of sound in the median sagittal plane," J. Acoust. Soc. Am. 61, 1264-1269 (1977).
- (47) 藤木五郎, 榎谷 薫, 丸山文央, "ステレオフォニックにおける正面虚音像について," 聴覚研資, H-81-23 (1981).
- (48) Hanson, R. L. and Kock, W. E., "Interesting effect produced by two loudspeakers under free space conditions," J. Acoust. Soc. Am. 29, 145 (1957).
- (49) Jeffress, L. A., "Note on the "Interesting effect produced by two loudspeakers under free space conditions" by R. L. Hanson and W. E. Kock," J. Acoust. Soc. Am. 29, 655 (1957).
- (50) Leakey, D. M., "Further effects produced by two loudspeakers in echo-free conditions," J. Acoust. Soc. Am. 29, 966 (1957).
- (51) Heegaard, Fr., "The reproduction of sound in auditory perspective and a compatible system of stereophony," Europ. Broadcasting Union Review, Part A - Technical 52, 2-6 (1958).
- (52) Coleman, P. D., "Failure to localize the source distance of an unfamiliar sound," J. Acoust. Soc. Am. 34, 345-346 (1962).
- (53) Gardner, M. B., "Distance estimation of 0° or apparent 0° -

- Oriented speech signals in anechoic space," J. Acoust. Soc. Am. 45, 47-53 (1969).
- (54) Toole, F. E., "In - head localization of acoustic images," J. Acoust. Soc. Am. 48, 943-949 (1970).
- (55) Plenge, G., "Über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation," Acustica 26, 241-252 (1972).
- (56) Plenge, G., "On the differences between localization and lateralization," J. Acoust. Soc. Am. 56, 944-951 (1974).
- (57) 森本政之, "音の距離定位について," 音響学会誌 34, 356-361 (1978).
- (58) Butler, R. A., Levy, E. T., and Neff, W. D., "Apparent distance of sounds recorded in echoic and anechoic chambers," J. Experi. Psychol.: Human Perception and Performance 6, 745-750 (1980).
- (59) Licklider, J. C. R., "The influence of interaural phase relations upon the masking of speech by white noise," J. Acoust. Soc. Am. 20, 150-159 (1948).
- (60) Damaske, P., "Subjective Untersuchung von Schallfeldern," Acustica 19, 199-213 (1967/68).
- (61) Chernyak, R. I. and Dubrovsky, N. A., "Pattern of the noise images and the binaural summation of loudness for the different interaural correlation of noise," 6th ICA, A-3-12 (1968).
- (62) Gardner, M. B., "Image fusion, broadening, and displacement in sound location," J. Acoust. Soc. Am. 46, 339-349 (1969).
- (63) 穴沢健明, 柳川博文, 伊藤 毅, "両耳間相関係数と「拡がり感」について," 電気音響研資, EA70-13 (1970).
- (64) Barron, M., "The subjective effects of first reflections in concert halls - The need for lateral reflections," J. Sound Vib. 15, 475-494 (1971).
- (65) Damaske, P. and Ando, Y., "Interaural crosscorrelation for multi-channel loudspeaker reproduction," Acustica 27, 232-238 (1972).
- (66) 柳川博文, 東秀司郎, 森 秀一, "擬似頭による両耳間相関係数と拡がり感について," 聴覚研資, H-35-1 (1976).
- (67) Ando, Y., "Subjective preference in relation to objective parameters

- of music sound fields with a single echo," J. Acoust. Soc. Am. 62, 1436-1441 (1977).
- (68) Ando, Y. and Kageyama, K., "Subjective preference of sound with a single early reflection," Acustica 37, 111-117 (1977).
- (69) 安藤四一, 森岡研三, "音場の主観的プリファレンスにおける聴取音圧レベルと両耳間相関度の影響," 音響学会誌 37, 613-618 (1981).
- (70) 黒住幸一, 大串健吾, "2チャンネル音響信号の相互相関関数とヘッドホン受聴時における音像の空間的印象," 音響学会誌 41, 368-377 (1985).
- (71) 黒住幸一, 大串健吾, "2チャンネル音響信号の相関係数と音像の質," 音響学会誌 39, 253-260 (1983).
- (72) Jeffress, L. A. and Robinson, D. E., "Formulas for the coefficient of interaural correlation for noise," J. Acoust. Soc. Am. 34, 1658-1659 (1962).
- (73) Kruskal, J. B., "Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis," Psychometrika 29, 1-27 (1964).
- (74) Kruskal, J. B., "Nonmetric multidimensional scaling: A numerical method," Psychometrika 29, 115-129 (1964).
- (75) 日科技連官能検査委員会, 官能検査ハンドブック, 新版 (日科技連出版社, 東京, 1973), P.253.
- (76) 日科技連官能検査委員会, 官能検査ハンドブック, 新版 (日科技連出版社, 東京, 1973), P.829.
- (77) 黒住幸一, 大串健吾, "2チャンネル音響信号の相互相関関数とヘッドホン受聴時における音像の拡がり感の対応関係," 音響学会誌 42, 425-431 (1986).
- (78) Schubert, E. D. and Wernick, J., "Envelope versus microstructure in the fusion of dichotic signals," J. Acoust. Soc. Am. 45, 1525-1531 (1969).
- (79) Gabriel, K. J. and Colburn, H. S., "Interaural correlation discrimination: I. Bandwidth and level dependence," J. Acoust. Soc. Am. 69, 1394-1401 (1981).
- (80) Sayers, B. Mc A. and Cherry, E. C., "Mechanism of binaural fusion in the hearing of speech," J. Acoust. Soc. Am. 29, 973-987 (1957).
- (81) Cherry, C., "Two ears - but one world," in Sensory communication,

- Rosenblith, W. A. Ed., (The M. I. T. Press, 1961), Chap. 6, P. 99.
- (82) Kurozumi, K. and Ohgushi, K., "The relationship between the cross-correlation coefficient of two-channel acoustic signals and sound image quality," J. Acoust. Soc. Am. 74, 1726-1733 (1983).
- (83) 黒住幸一, 大串健吾, "音像の空間的印象の定量的表現," 音響学会誌 40, 452-459 (1984).
- (84) Kock, W. E., "Binaural localization and masking," J. Acoust. Soc. Am. 22, 801-804 (1950).
- (85) Lochner, J. P. A. and Keet, W. V., "Stereophonic and quasi-stereophonic reproduction," J. Acoust. Soc. Am. 32, 393-401 (1960).
- (86) 江端正直, 曾根敏夫, 二村忠元, "騒音中における音声信号の聴取について," 電気音響研資, 音響 64, 10-14 (1964. 10).
- (87) Plomp, R., "Binaural and monaural speech intelligibility of connected discourse in reverberation as a function of azimuth of a single competing sound source (speech or noise)," Acustica 34, 200-211 (1976).
- (88) McFadden, D., "Masking-level differences with continuous and with burst masking noise," J. Acoust. Soc. Am. 40, 1414-1419 (1966).
- (89) 日科技連官能検査委員会, 官能検査ハンドブック, 新版(日科技連出版社, 東京, 1973), P.401.
- (90) 田中良久, 心理学的測定法, 第2版(東京大学出版会, 東京, 1977), P.35.
- (91) 黒住幸一, 大串健吾, "相関係数変化法による新しい音像の拡がり感制御方式," 通信学会論文誌A J67-A, 204-211 (1984).
- (92) 電波科学編集部, "テレビの音を拡げる回路のいろいろ," 電波科学 572, 140-148 (1980-04).
- (93) Lauridsen, H., "Nogle forsøg med forskellige former for rumakustisk gengivelse og forslag til og forsøg med et stereofonisk system med utraditionel informationsfordeling mellem to kanaler," Ingeniøren 47, 906-910 (1954).
- (94) 後藤敏幸, 木村陽一, "バイノーラル技術の現状," 放送技術 29, 363-369 (1976).
- (95) Schroeder, M. R., "An artificial stereophonic effect obtained from a

single audio signal," J. Audio Eng. Soc. 6, 74-79 (1958).

(96) 日野幹雄, スペクトル解析, (朝倉書店, 東京, 1977), P.142.

(97) 黒住幸一, 二階堂誠也, 大串健吾, "相関係数変化法による音像の距離感制御方式," 通信学会論文誌A J67-A, 872-879 (1984) .

(98) 伊東孝久, "ステレオ・ドラマ“鉄の伝説”の制作," 放送技術 27, 397-409 (1974).

付録1 多次元尺度構成法 (Multidimensional Scaling: MDS)

MDSとは、着目している対象の間の類似度（あるいは非類似度）が与えられているときに、対象を多次元空間内の点として表し、類似度が大きくなるにしたがって点間の距離が小さくなるような点の布置を定める方法である。

いま、 n 個（ $1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n$ ）の対象があると仮定する。 n 個の対象において2つずつの組み合わせは $n(n-1)/2$ 通りである。対象 i と j の関係を一般的に n 次のマトリックスで表すが、マトリックスの (i, j) 要素が、対象 i と j が似ているほど大きな値をとる場合を類似性マトリックスと呼び、対象 i と j が似ていないほど大きな値をとる場合を非類似性マトリックスと呼ぶ。

Kruskalは、対象 i と j の関係を表す指標として非類似度 δ_{ij} を用いた。その際、 δ_{ij} の絶対的な値ではなく（メトリックMDSでは距離に対応させる）、その値の順序を問題にした（ノンメトリックMDS）。したがって、非類似度 δ_{ij} が与えられていれば、その順序を逆にすることによって類似度 s_{ij} のマトリックスを得ることができる。

ノンメトリックMDSの目的は、先に述べたように、 t 次元（ユークリッド）空間内に、次のような n 個の点の布置を求めることにある。すなわち、布置の点 x_i と点 x_j の間の距離 d_{ij} が、与えられた類似度のデータ s_{ij} と単調関係にあること、つまり

$$s_{ij} > s_{kl} \text{ ならば必ず } d_{ij} < d_{kl}$$

であるような n 個の点の布置を求めることにある。ただし、Kruskalは、点 x_i の t 次元空間での座標を

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is}, \dots, x_{it}) \quad (\text{A.1})$$

で表し、点 x_i と x_j の距離 d_{ij} を

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{s=1}^t (x_{is} - x_{js})^2} \quad (\text{A.2})$$

で定義した（ユークリッド距離）。

類似度の順序と対象間距離の単調関係を得るためには、布置の次元数を十分大きくとれば良いが、次元数が大きくなりすぎると布置の解釈が困難になるので、MDSをほどこした意味が無くなる。そこで、類似度の順序と対象間距離の単調関係を多少犠牲にしても、次元数を減らす必要が生じる。Kruskalは、この単調関係からのずれの程度を示す指標としてストレス（適合度）という概念を導入した。まず、類似度のデータ s_{ij} と布置が与えられているとき、

$$s_{ij} > s_{kl} \text{ ならば必ず } \hat{d}_{ij} \leq \hat{d}_{kl}$$

となり，しかも

$$S^* = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=2 \\ (i < j)}}^n (d_{ij} - \hat{d}_{ij})^2 \quad (\text{A.3})$$

を最小にする数列 \hat{d}_{ij} および S^* を求める。次に， S^* を

$$T^* = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=2 \\ (i < j)}}^n d_{ij}^2 \quad (\text{A.4})$$

で割り S^* / T^* を求める。この値は空間布置の伸縮（座標系の平行移動，回転，拡大縮小）によらず一定の値をとる。Kruskalは，この平方根

$$S = \sqrt{S^* / T^*} \quad (\text{A.5})$$

をストレスと呼び，類似度の順序と対象間距離の単調関係からのずれ（あてはめた $\{\hat{d}_{ij}\}$ と $\{d_{ij}\}$ のずれ）を表す指標とした。ストレス S の値が小さいほど類似度のデータと布置が良く適合していることを示すので，MDSによる分析では，ストレスを最小にする布置を求めることになる。Kruskalは，数多い経験と実験データの積み重ねから，ストレスを Table A.1 のように評価している。

Kruskal のアルゴリズムでは，ある固定した次元数のもとで，ストレス S を最小にする空間布置 $X = \{x_i\}$ を逐次近似法によって求める。

まず，次元数 t を固定する。第 m ステップでは既知の空間布置 X_m から対象間距離 $\{d_{ij}\}$ を計算する。そして d （距離）軸に関する $n(n-1)/2$ 通りの対象間距離の偏差自乗和が最小となるように単調曲線のあてはめをして $\{\hat{d}_{ij}\}$ を求め， $\{d_{ij}\}$ と $\{\hat{d}_{ij}\}$ よりストレス S_m を計算する。次に， S_m をより小さくするように最大傾斜法によって X_m を変化させる（局所最小値を求めることになるので X の初期値が関係する）。変化した X_m を第 $(m+1)$ ステップにおける

X_{m+1} とする。この操作を繰り返し，逐次近似を進め，ストレス S がある値以下には減少しなくなった時点で t 次元空間における解 X が定まる。ただし，すでに述べたように，Kruskal の MDS による解は次元を一定とした場合でも一意的には定まらず，初期布置によっても変わり得るので数種類の初期布置を与え，それらの中でストレスが最小となる解を採用する。

Table A.1 Evaluation of stress.

Stress	Goodness of fit
0.20	poor
0.10	fair
0.05	good
0.025	excellent
0.0	perfect

最小次元空間は次のようにして求める。次元を1つ追加して $(t+1)$ 次元空間において S を最小とする解 X を求める。このように次元を1つずつ追加することにより、次元数を増加してもある程度以下には S が減少しなくなった次元で最小次元空間が定まる。一般的には、研究者は4～6次元までの布置をすべて求め、ストレスが十分小さくなる最小の次元の解を採用することになる。本論文において分析したデータは3次元以下の空間ですべてストレスが0となったので、ストレスが0となる最小の次元の解を採用した。

ところで、MDSによる分析では対象間の距離関係のみが結果として得られるので、任意に座標軸を定めることができる。本論文においては物理的な解釈が容易である直交する軸を採用した。したがって、軸の心理的な解釈をすることにより心理的に独立な要因を見い出すことができる。

分析結果の代表的な例として、Fig. 6.2(a)について説明する。Fig. 6.2(a)は相関係数 r の異なる7種の白色雑音対をスピーカ再生した場合の音像の空間的印象が心理的にどのように知覚されるのかを示している。黒丸は各音像の心理的な位置を示しており、黒丸間の距離が音像の空間的印象の非類似度に対応している。例えば、 $r=1$ と0の音像の空間的印象は非常に異なっていること、 $r=1/3$ と $2/3$ の音像の空間的印象は良く似ていることを示している。直交座標系は任意に引くことができるので、物理的な解釈が容易である2つの直交する軸を採用した。すなわち、I軸(DIM 1)は相関係数の絶対値に、II軸(DIM 2)は相関係数そのものの値に対応させた。各軸の心理的要因を明らかにする心理実験を行った結果、I軸は音像の拡がり感に対応する(相関係数の絶対値が小さくなるほど音像の拡がり感は大きくなる)こと、II軸は音像の距離感に対応する(相関係数が -1 に近づくほど音像の距離感が小さくなる)ことが明らかになった。

付録2 相互相関関数 $r(\tau)$ の導出

左右の音響信号は (9.2)式を (9.1)式に代入して

$$\left. \begin{aligned} L(t) &= \int_0^B a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_f) df \\ R(t) &= \int_0^B a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_f - \Delta\theta) df \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.6})$$

と表すことができる。したがって、 $r(\tau)$ は

$$\begin{aligned} r(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \int_0^B a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_f - \Delta\theta) df \right\} \right. \\ &\quad \times \left. \left\{ \int_0^B a_f(t + \tau) \cdot \cos(2\pi f t + 2\pi f \tau + \theta_f) df \right\} dt \right] \\ &\quad \times \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \int_0^B a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_f - \Delta\theta) df \right\}^2 dt \right]^{-1/2} \\ &\quad \times \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \int_0^B a_f(t) \cdot \cos(2\pi f t + \theta_f) df \right\}^2 dt \right]^{-1/2} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

となる。低域雑音のパワースペクトル密度関数は一定なのでこれを C_0 とおくと、 $r(\tau)$ の分母は T が無限大のとき $C_0 \cdot B$ に収束する。さらに、周波数の異なる成分が直交することを利用すれば

$$\begin{aligned} r(\tau) &= \frac{1}{C_0 \cdot B} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^B a_f(t) \cdot a_f(t + \tau) \\ &\quad \times \cos(2\pi f t + \theta_f - \Delta\theta) \cdot \cos(2\pi f t + 2\pi f \tau + \theta_f) \cdot df \cdot dt \\ &= \frac{1}{C_0 \cdot B} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^B a_f(t) \cdot a_f(t + \tau) \\ &\quad \times \frac{1}{2} [\cos(2\pi f \tau + \Delta\theta) + \cos(4\pi f t + 2\pi f \tau + 2\theta_f - \Delta\theta)] df dt \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

となる。(A.8) 式の被積分項を展開すると第2項は T が無限大のとき 0 に収束するので

$$\begin{aligned} r(\tau) &= \frac{1}{C_0 \cdot B} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^B \frac{1}{2} \cdot a_f(t) \cdot a_f(t + \tau) \cdot \cos(2\pi f \tau + \Delta\theta) df dt \\ &= \frac{1}{C_0 \cdot B} \int_0^B \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \cdot a_f(t) \cdot a_f(t + \tau) dt \right] \cdot \cos(2\pi f \tau + \Delta\theta) df \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

である。ここで

$$C_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \cdot a_f(t) \cdot a_f(t+\tau) dt \quad (\text{A.10})$$

とおくと

$$r(\tau) = \frac{\int_0^B C_f(\tau) \cdot \cos(2\pi f\tau + \Delta\theta) df}{C_0 \cdot B} \quad (\text{A.11})$$

と表すことができる。次に、 $C_f(\tau)$ を求める。(A.11)式で $\Delta\theta = 0$ とおくと、周波数帯域が0からB (Hz) までの低域雑音の自己相関関数 $\sin(2\pi B\tau)/2\pi B\tau$ と等しくなるので

$$\frac{\int_0^B C_f(\tau) \cdot \cos(2\pi f\tau) df}{C_0 \cdot B} = \frac{\sin(2\pi B\tau)}{2\pi B\tau} \quad (\text{A.12})$$

が恒等的に成り立つ。したがって、

$$\begin{aligned} \int_0^B C_f(\tau) \cdot \cos(2\pi f\tau) df &= \frac{C_0}{2\pi\tau} \cdot \sin(2\pi B\tau) \\ &= \int_0^B C_0 \cdot \cos(2\pi f\tau) df \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

である。(A.13)式はすべての τ およびBに対して成り立つので

$$C_f(\tau) = C_0 \quad (\text{A.14})$$

である。(A.14)式を (A.11) 式に代入し

$$\begin{aligned} r(\tau) &= \frac{\int_0^B C_0 \cdot \cos(2\pi f\tau + \Delta\theta) df}{C_0 \cdot B} \\ &= \frac{\sin(\pi B\tau)}{\pi B\tau} \cdot \cos(\pi B\tau + \Delta\theta) \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

が得られる。

付録3 $\alpha^\circ = 70^\circ$ の導出

Fig. 9.6 に示す逆連動型音量減衰器A1およびA2の減衰量を左右の音響信号を示すベクトルの軌跡がFig. 9.7 に示すように楕円を描くように設定する。 L_{90} および R_{90} の大きさをそれぞれ a , b とすると, R_{90} の大きさが L_{90} の大きさより 3 dB 小さくなる条件は

$$\frac{a}{b} = \sqrt{2} \quad (\text{A.16})$$

である。一方, L_{90} を合成するときの L_0 および L_{180} 方向のベクトルの大きさはいずれも $\sqrt{a^2 + b^2} / 2$ である。したがって, 余弦定理より

$$a^2 = \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \right)^2 - 2 \cdot \frac{a^2 + b^2}{4} \cdot \cos(180 - \alpha) \quad (\text{A.17})$$

が成り立つ。(A.16)および(A.17)式より

$$\cos \alpha = \frac{1}{3} \quad (\text{A.18})$$

となる。すなわち,

$$\begin{aligned} \alpha &= \cos^{-1} \left(\frac{1}{3} \right) \\ &= 70.5^\circ \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

が得られる。

付録4 相互相関関数 $r(\tau)$ の導出

A1の減衰量が0 dBでA2の減衰量が無限大の場合およびA1の減衰量が無限大でA2の減衰量が0 dBの場合の相互相関関数 $r(\tau)$ はそれぞれ

$$r(\tau) = \delta(\tau) / \delta(0) \quad (\text{A.20})$$

$$r(\tau) = -\delta(\tau) / \delta(0) \quad (\text{A.21})$$

となる。次に、A1およびA2の減衰量が等しくともに3 dBの場合の相互相関関数を求める。Fig. 9.9 の入力音響信号である白色雑音を $n(t)$ とすれば、左右の音響信号 $L(t)$ および $R(t)$ はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} L(t) &= A[n(t) + n(t - \tau_D)] \\ R(t) &= A[n(t) - n(t - \tau_D)] \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.22})$$

と表すことができる。ただし、 $A = 1/\sqrt{2}$ である。したがって、相互相関関数は(2.1)式より

$$r(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{A^2}{T} \int_0^T \{n(t) - n(t - \tau_D)\} \cdot \{n(t + \tau) + n(t - \tau_D + \tau)\} dt}{\left[\frac{A^2}{T} \int_0^T \{n(t) - n(t - \tau_D)\}^2 dt \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{A^2}{T} \int_0^T \{n(t) + n(t - \tau_D)\}^2 dt \right]^{1/2}} \quad (\text{A.23})$$

となる。すなわち、

$$r(\tau) = \frac{1}{2} [-\delta(\tau + \tau_D) + \delta(\tau - \tau_D)] / \delta(0) \quad (\text{A.24})$$

が得られる。